



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'informazione

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Comunicazioni power line e algoritmi di routing per reti smart grid

Candidato:
Alberto Vanuzzo

Relatore:
Leonardo Badia

Indice

1	Introduzione: le reti smart grid	4
2	Le power line	10
2.1	Power line communications: caratteristiche principali e classificazione	10
2.2	Il canale power line e il suo modello	12
2.3	Physical Layer	13
2.4	Data Link Layer	15
2.5	Esempi di applicazioni	17
2.5.1	Il sistema REMPLI	17
2.5.2	Il sistema PRIME	18
3	Il routing su reti smart grid con power line	21
3.1	Punti cruciali e classificazione delle sottoreti	21
3.2	Routing in reti Home Area Network su PLC	25
3.2.1	Algoritmo Adaptive Channel State Routing (ACSR)	25
3.3	Cenni al routing su reti HAN ibride	29
3.4	Routing in reti Neighbourhood Area Network su PLC	30
3.4.1	Algoritmi derivati dalle reti wireless	31
3.4.1.1	Algoritmo Improved On-Demand Distance Vector (IPODV)	31
3.4.1.2	Algoritmi di routing geografico	32
3.4.1.3	Confronto tra gli algoritmi di routing geografico	35
3.4.2	Algoritmi specifici per PLC	38
3.4.2.1	Algoritmo Powerline Multipath Routing (PMR)	38
4	Conclusioni	41
	Bibliografia	43

Abstract

In questa tesi è fornita una descrizione generale delle reti smart grid (classificazioni, caratteristiche e principali applicazioni), a cui segue una trattazione riguardante la tecnologia power line utilizzata in tali reti, con due esempi di progetti su larga scala; viene evidenziato il problema del routing sulle smart grid che impiegano tecnologia power line, a seguire vi è una classificazione dimensionale delle sottoreti che compongono una smart grid, e la trattazione di alcuni efficaci algoritmi di routing applicabili a tali strutture, o creati specificatamente per esse.

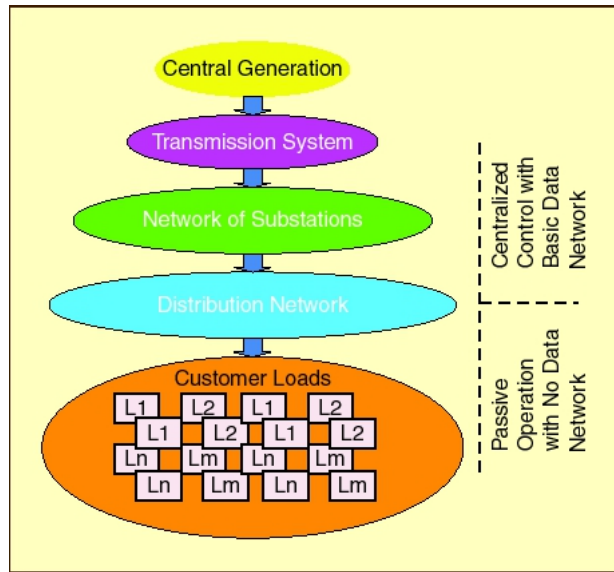


Figura 1.1: Schema di rete elettrica tradizionale; tratta da [1]

Capitolo 1

Introduzione: le reti smart grid

Al giorno d'oggi, è evidente che non è più possibile basare la produzione di energia esclusivamente sui combustibili fossili, e ci sono esigenze di affidabilità sempre maggiore della rete di distribuzione, a causa delle caratteristiche di apparecchiature digitali sempre più sensibili, dai grandi data center fino all'elettronica di consumo. Le reti elettriche esistenti, di cui è fornito uno schema nella figura 1.1, sono un prodotto dell'evoluzione urbanistica delle città avvenuta nel secolo scorso, e la loro topologia è rimasta inalterata nel tempo; il sistema gerarchico che identifica una rete elettrica tradizionale prevede che i sottosistemi di generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia siano marcatamente divisi [2]: non è prevista nessuna comunicazione real time tra di essi, ed essendo impossibile la previsione di picchi di richiesta dell'energia, è necessario predisporre un sistema che li possa sopportare,

ma che risulta in tal modo sovradimensionato per la maggior parte degli utilizzi. Tutto ciò rende la tradizionale rete elettrica un sistema intrinsecamente inefficiente. Da questo quadro tecnologico, nasce l'esigenza di una modernizzazione della rete. Il termine smart grid [1] identifica una rete elettrica "intelligente", in grado di migliorare l'efficienza, la sicurezza e l'affidabilità della gestione dell'energia. Una smart grid è una rete in grado di distribuire l'energia attraverso un sistema bidirezionale, che permette il controllo dei consumi, e quindi la regolazione della distribuzione, in tempo reale. L'enorme sviluppo del settore IT (Information Technology) negli ultimi anni facilita la decentralizzazione di sistemi di gestione dell'energia, e infatti l'informatica e le telecomunicazioni, così come l'elettronica, hanno un ruolo chiave nella progettazione di una smart grid. Volendo illustrare i principali vantaggi di una rete di questo tipo, si possono citare i seguenti [1]:

- gestione dell'energia in maniera efficiente grazie a strategie di controllo e immagazzinamento che rendono possibile l'adattamento del flusso di energia alle richieste del sistema
- suddivisione del sistema in numerose piccole "micro grid" autonome, con locale capacità di generazione dell'energia e in connessione col resto del sistema
- canale bidirezionale che permette lo scambio di informazioni tra utenti e gestori
- riduzione delle emissioni di CO_2 grazie al monitoraggio dei consumi e alla gestione di più fonti di energia all'interno del sistema (i dati quantitativi su questo aspetto sono trattati in [1])
- benefici economici per l'utente finale: recenti test [1] hanno evidenziato che anche solo le tecnologie di monitoraggio e controllo dei consumi porterebbero una riduzione del 10% all'anno dell'importo delle bollette elettriche, e si stima che se applicate su larga scala, le smart grid potrebbero ridurre i picchi di richiesta dell'energia del 15% all'anno

A livello europeo, un primo schema della commissione europea sulla struttura di una smart grid risale al 2005 ed è illustrato nella figura 1.2 [2].

Per lo sviluppo di future smart grid in Europa, sarà necessario valutare l'estensione della rete e le migliori tecnologie di connessione con le reti delle nazioni confinanti, e implementare soluzioni dedicate al monitoraggio e controllo dell'energia su larga scala; al fine di raggiungere gli obiettivi posti, si rende indispensabile una coordinazione tra i vari TSO (transmission system operators), concretizzata il 16 febbraio 2009 con la nascita del CORESO (Coordination of Electricity System Operators), prima organizzazione del genere nell'Europa centro-occidentale. Nell'ambito della ricerca, le smart grid coinvolgono varie università ed enti governativi; al giorno d'oggi, i principali punti chiave [19] sull'argomento sono:

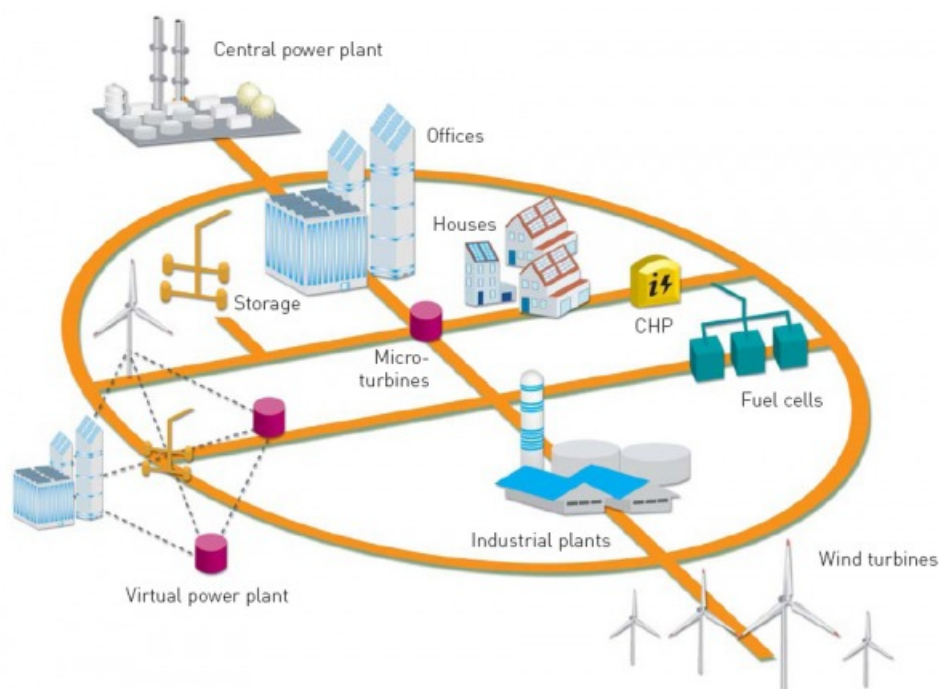


Figura 1.2: Schema generale di una smart grid; tratta da [2]

- affidabilità: la rete deve essere più resistente possibile a danni e malfunzionamenti, e devono essere implementati sistemi che permettano tale robustezza senza un intervento costante; a tal proposito si cita la caratteristica delle smart grid di “riconfigurarsi” in caso di necessità: si possono cioè escludere dalla rete alcune parti danneggiate permettendo il perfetto funzionamento della parte restante della struttura.
- sicurezza: essendo la rete completamente informatizzata, è soggetta al rischio di danneggiamento da parte di hackers.
- integrazione e gestione delle fonti di energia rinnovabile: ad esempio, riguardo l’energia eolica, è necessaria la previsione accurata delle condizioni del vento per prevedere la potenza erogabile, e gestire i picchi di energia da trasmettere nel sistema nel caso la destinazione sia lontana dal luogo di generazione.
- sistemi di immagazzinamento dell’energia: la disponibilità variabile di alcuni tipi di energia rende indispensabile immagazzinarla in modo efficace e conveniente
- ruolo degli utenti: all’interno di una smart grid, gli utenti finali hanno un ruolo chiave, perché il monitoraggio dei loro consumi energetici è uno strumento

indispensabile per la gestione della distribuzione; tuttavia emerge il problema della privacy e si dovrà regolamentare il trattamento dei dati accumulati.

- veicoli elettrici: questi mezzi di trasporto saranno integrati nelle smart grid, ed oltre a sfruttare l'energia da esse prodotta, potranno anche cederla alla rete stessa in caso di necessità

Tra le architetture tecnologiche basilari per una smart grid si annoverano l'Advanced Metering Infrastructure (AMI) e la Distributed Generation (DG). L'AMI sfrutta tecnologie di comunicazione digitali per costruire un sistema attivo di interazione tra utente e distribuzione, focalizzato in due punti essenziali [3]:

- real time pricing: cambiamento delle tariffe energetiche in tempo reale in base all'andamento del mercato e/o alle scelte dell'utente
- auto meter reading: lettura e analisi dei consumi automatica

Per i vantaggi che può fornire in termini di risparmio energetico, affidabilità della rete e convenienza per l'utente, l'AMI ha un ruolo fondamentale nelle smart grid ed è una delle prime tecnologie sviluppate nei relativi progetti. Riguardo la Distributed Generation, essa concerne l'integrazione di molteplici fonti energetiche all'interno della smart grid, ciascuna gestita con soluzioni tecniche dedicate, come pannelli solari e pale eoliche: si veda in proposito la figura 1.3, e la tabella di figura 1.4, con le principali fonti energetiche per le smart grid e le relative potenze erogabili. Uno dei principali vantaggi della Distributed Generation è la capacità di accumulare energia così da garantire un flusso molto regolare, a prevenzione dei picchi di carico e a garanzia della qualità della potenza erogata. A titolo informativo, è degno di nota il fatto che negli Stati Uniti, la capacità della DG è cresciuta da 5.423 MW del 2004 a 12.702 MW del 2007, con un incremento del 234%.

Per quanto concerne i sistemi di comunicazione utilizzati nelle smart grid, essi ne sono un elemento chiave, e devono gestire grossi flussi di dati provenienti dagli strumenti digitali disseminati nella rete; definire il sistema di comunicazione ideale per tale struttura non è banale [4], poiché è necessario trovare quello che rende il flusso dei dati il più affidabile, sicuro ed economico possibile. A tal proposito, un esempio è la comunicazione tra i sensori disseminati nella rete e gli smart meters; questi ultimi sono dispositivi digitali programmabili che in una smart grid sostituiscono i tradizionali misuratori di corrente, implementando molte funzioni aggiuntive per l'analisi dei consumi; in tali comunicazioni, le tecnologie di trasmissione sono basate sia su wireless che su cavo: il primo annovera tra i principali vantaggi la semplicità di utilizzo e la possibilità di raggiungere alcune aree altrimenti irraggiungibili; d'altro canto, l'attenuazione del segnale e le interferenze sono invece lati negativi, così come la dipendenza della funzionalità dei dispositivi da batterie. Le tecnologie utilizzate nella progettazione delle smart grid devono

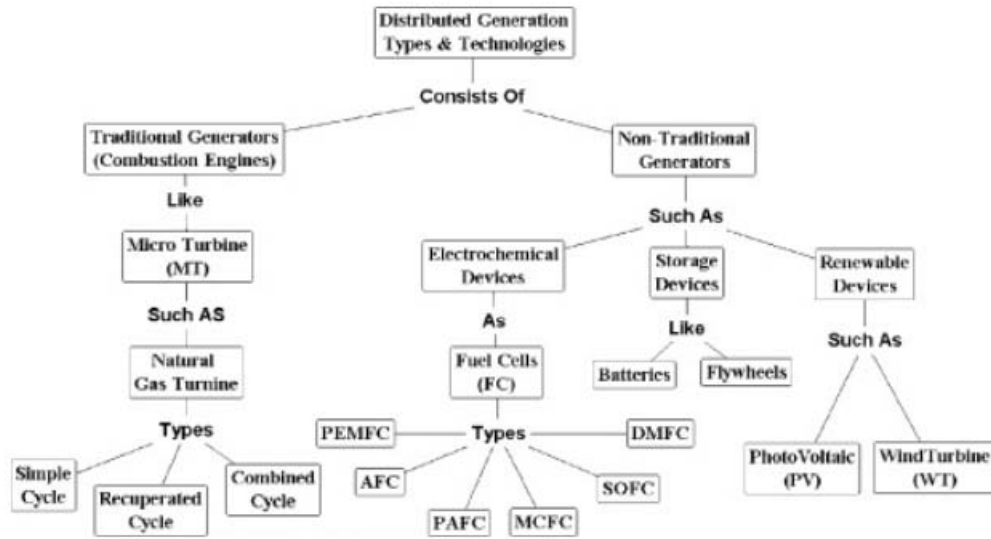


Figura 1.3: Una rappresentazione della Distributed Generation; tratta da [3]

Tech	Typical available size per module
Small hydro	1-100MW
Micro hydro	25kW-1MW
Wind turbine	200W-3MW
Photovoltaic arrays	20W-100kW
Solar thermal, central receiver	1-10MW
Solar thermal, Lutz system	10-80MW
Biomass	100kW-20MW
Fuel cells, phosacid	200kW-2MW
Fuel cells, molten carbonate	250kW-2MW
Fuel cells, proton exchange	1kW-250kW
Fuel cells, solid oxide	250kW-5MW
Geothermal	5-100MW
Ocean energy	100kW-1MW
Sterling engine	2-10kW
Battery storage	500kW-5MW

Figura 1.4: Fonti energetiche utilizzabili da una smart grid e relative potenze erogabili; tratta da [3]

da un lato soddisfare precisi requisiti prestazionali e dall'altro assicurare la massima ottimizzazione in termini di costi d'investimento. L'utilizzo dell'infrastruttura power line per il transito di dati necessari ai servizi forniti da una smart grid, argomento approfondito nel capitolo 2, è forse l'esempio più evidente di applicazione del paradigma sopra citato: utilizzare una struttura già presente nella rete per un nuovo scopo, ovviamente coadiuvata delle migliori tecnologie, porta alla creazione di un sistema funzionale e prestazionale; tutto ciò si ottiene facendo ovviamente fronte a problemi di ottimizzazione, e nel capitolo 3 di questa tesi ne sarà trattato uno fondamentale: il routing, cioè lo studio della migliore strategia di trasmissione dei dati tra elementi della rete; dopo la definizione del problema, saranno esposti alcuni algoritmi di routing per comunicazioni su power line, e le relative prestazioni.

Capitolo 2

Le power line

2.1 Power line communications: caratteristiche principali e classificazione

Per Power Line Communications (PLC) si intende una tecnologia che utilizza la rete elettrica esistente per la trasmissione di segnali tra i dispositivi collegati alla rete [4]. Le comunicazioni su power line, anche se ancora in evoluzione, sono una soluzione che ha avuto origine ideologica nel primo '900 [6], e nel corso del tempo sono state usate dalle grandi aziende di distribuzione dell'energia per effettuare misurazioni da remoto e controllare i carichi da gestire, usando inizialmente una singola portante a banda stretta (Narrow Band) che permetteva data rates (numero di bit trasmessi al secondo) molto bassi, dell'ordine di pochi kb/s; l'evoluzione ha portato allo sviluppo di sistemi broadband PLC, che operano ad alte frequenze, e raggiungono data rate dell'ordine dei 200 Mbps o più nei dispositivi più recenti. Negli ultimi anni è in atto un forte sviluppo delle high-data-rate power line, operanti in frequenze comprese tra i 3 e i 500 kHz [6]. Tra le recenti applicazioni delle PLC ci sono la fornitura di accesso Internet alle utenze residenziali e connessioni LAN (acronimo di Local Area Network) all'interno di case o uffici. La tecnologia power line non ha ancora propriamente raggiunto una vera diffusione nel mercato di massa, ma il profilarsi all'orizzonte delle smart grid ha dato un nuovo impeto all'impiego delle power line, che per certi versi sono particolarmente adatte come supporto per varie applicazioni all'interno delle suddette reti elettriche di nuova generazione. Un esempio di applicazione di tale tecnologia riguarda gli smart meters, i misuratori di corrente di nuova generazione, che sono connessi a centri intermedi di gestione dei dati tramite power line; da questi poi vengono inviate le informazioni ai data center mediante tecnologia cellulare, come il GPRS (General Packet Radio Service). Un esempio nazionale di struttura così configurata è la smart grid messa appunto da Enel, che usa le PLC, e il protocollo GSM per il trasferimento ai data center (a tal proposito è necessario precisare che tale rete italiana non implementa tutte le funzioni di una vera smart grid, ma sol-

tanto quelle di smart metering). Tra i vantaggi delle power line nell'ambito delle smart grid [4], è fondamentale il fatto che l'infrastruttura su cui esse si basano è già esistente, quindi dal punto di vista economico ciò si traduce in un sostanziale risparmio; grazie a tale capillarità, inoltre, la rete risulta estremamente adatta per le applicazioni di misurazione e controllo. I lati negativi, d'altro canto, possono essere attribuibili [4] alla rumorosità intrinseca del canale di trasmissione, che sarà trattato nel prossimo paragrafo, e alla larghezza di banda relativamente bassa, che ne restringe il campo d'applicazione. Allo stato attuale, ci sono numerose soluzioni tecnologiche sviluppate e molte di più ancora in via di sviluppo nell'ambito delle smart grid: affinché una tale struttura possa diventare realtà, tuttavia, è necessario definire standard di interoperabilità per i vari elementi del sistema. Ci sono molti enti internazionali impegnati in questo senso, uno tra tutti l'ISO (International organization for standardization). Si elencano qui di seguito i principali standard per comunicazioni power line oggi esistenti [4]:

- HomePlug: tecnologia che sfrutta la rete elettrica delle abitazioni per connettere gli strumenti della smart grid alla Home Area Network (HAN) (per approfondimenti sulla classificazione delle reti in base alle dimensioni, si veda il capitolo 3.1)
- HomePlug Green PHY: prevede networking su power line a basso costo, sviluppato per applicazioni su HAN dallo Smart Energy Technical Working Group, facente parte della HomePlug Powerline Alliance; si integra con dispositivi HomePlug e supporta networking IP
- PRIME: standard power line aperto e globale, supportato tra gli altri da STMicroelectronics, che sarà trattato nel capitolo 2.5.2
- G3-PLC: set di specifiche creato da ERDF e MAXIM che mira all'interoperabilità, alla sicurezza della rete, alla robustezza e alla riduzione dei costi

Le reti elettriche tradizionali sono basate sulla ormai datata infrastruttura centralizzata, a cui si fa riferimento quando si parla di Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) [6] : il concetto di smart grid ha fatto emergere da un lato l'inadeguatezza del sistema SCADA, dall'altro la difficoltà di progettare uno specifico modello a strati per la nuova infrastruttura; dal punto di vista delle telecomunicazioni, infatti, è necessario definire quantomeno tre livelli: physical, data link e network. Un punto di partenza potrebbe essere quello di caratterizzare la sorgente di informazione della smart grid, cioè la rete elettrica; qui emerge un aspetto interessante relativo alle PLC: la rete non è solo la sorgente del sistema ma, nell'ambito delle power line, essa diventa anche il mezzo di trasmissione, cioè appartiene al physical layer. L'importanza e le funzionalità precise delle PLC all'interno delle smart grid non sono ancora universalmente definite: un dato di

fatto è che il costo infrastrutturale delle PLC è l'unico paragonabile a quello delle soluzioni wireless, in quanto le linee di distribuzione sono già esistenti; l'utilizzo in supporto a tecnologie come l'AMI è indicazione del fatto che le PLC sono già un valido strumento a disposizione delle nuove reti elettriche. Esistono tuttavia due aspetti che potrebbero rallentare l'espansione delle power line: il primo [6] riguarda soprattutto gli Stati Uniti, e consiste nella scelta discutibile dei produttori di sistemi power line, i quali hanno proposto l'applicazione alle smart grid di sistemi PLC originariamente progettati per usi residenziali (nello specifico si parla di modem broadband-plc), limitando così le potenzialità dei dispositivi nel settore a cui devono essere applicati. Un secondo aspetto è relativo alla standardizzazione dei sistemi PLC, precedentemente accennata ma ancora in fase di sviluppo. Definiamo qui di seguito le tre principali classi di tecnologie power line, classificate in base alla banda di frequenze operative [6]:

- UNB (Ultra Narrow Band): operano a data rate molto bassi, dell'ordine dei 100 bps in frequenze di tipo ultra low, da 0.3 a 3 kHz, o nella parte superiore della banda super low frequency, da 30 a 300 Hz; esse sono adatte per l'utilizzo in aree di grandi dimensioni, potendo coprire distanze pari anche a 150 km o più. Sebbene il data rate sia così basso, i sistemi risultano molto scalabili grazie a tecniche di parallelizzazione; le soluzioni UNB sono impiegate in centinaia di applicazioni
- NB (Narrow Band): operano nelle bande VLF/LF/MF (da 3 a 500 kHz) e si dividono a loro volta in due categorie: Low Data Rate (LDR), a portante singola, con data rate di pochi kbps, e High Data Rate (HDR), multi portante e con rate fino a 500 kbps
- BB (Broad Band): operano in bande HF/VHF (da 1.8 a 250 MHz) e hanno rate che raggiungono le centinaia di Mbps

Segue ora una trattazione riguardante il canale power line, e dei primi due livelli della pila ISO/OSI di un sistema power line.

2.2 Il canale power line e il suo modello

Le power line non sono state specificatamente progettate per la trasmissione di dati, e l'utilizzo in tale ambito evidenzia l'ostilità intrinseca di tale mezzo di trasmissione. Gli aspetti salienti sono [22]: impedenze variabili, marcato rumore e alti livelli di attenuazione dipendente dalla frequenza; inoltre, la funzione di trasferimento del canale è tempo variante, poiché, ad esempio, accendendo o spegnendo dispositivi connessi alla rete, la topologia ne risulta modificata. Un altro elemento importante, che influisce sul rapporto segnale rumore (SNR, acronimo di Signal to Noise Ratio), è la posizione del trasmettitore o del ricevitore rispetto alle sorgenti

di rumore, come dispositivi di utilizzo domestico collegati alla rete: tanto più vicini sono tali strumenti al ricevitore, tanto più basso sarà l'SNR. In analogia con le reti wireless, la propagazione del segnale tra un trasmettitore e un ricevitore non avviene lungo un percorso unico e determinato: si verifica perciò la presenza di echi di trasmissione, a causa dei molteplici percorsi di propagazione; inoltre, a causa dell'impedenza variabile della rete, si verificano fenomeni di riflessione del segnale. Nel canale power line, infine, l'attenuazione aumenta all'aumentare della frequenza. Esso, quindi, può essere descritto come tempo variante, con SNR dipendente dalla frequenza sulla banda di trasmissione. Il rumore nel canale power line è un problema di elevata entità nelle trasmissioni dati poiché esso, in realtà, ha poca somiglianza al rumore gaussiano bianco solitamente utilizzato per i modelli di canale; tale rumore si classifica in quattro categorie (si veda la figura 2.1) [22]:

- Rumore colorato: questa tipologia ha una bassa densità spettrale di potenza (PSD), che decresce all'aumentare della frequenza; è considerato la somma di tutte le sorgenti di rumore a bassa potenza, e può essere tempo variante
- Rumore di fondo a banda stretta: esso è dovuto principalmente a segnali sinusoidali modulati in ampiezza; questo tipo di disturbo è creato dalle stazioni che trasmettono in modalità broadcast, nelle medie e basse frequenze. I livelli di interferenza variano nel tempo
- Rumore impulsivo sincrono con la frequenza del generatore: esso solitamente si ripete a multipli di tale frequenza, ha una durata di pochi microsecondi e la sua PSD decresce all'aumentare della frequenza; tale rumore è causato dagli alimentatori che operano in maniera sincrona con la frequenza principale di trasmissione
- Rumore impulsivo asincrono con la frequenza principale: questo è il tipo di rumore più dannoso per la trasmissione di dati; la sua durata varia da pochi microsecondi a millisecondi. La sua PSD può essere anche 50 dB oltre il livello del rumore di fondo, potendo così cancellare blocchi di dati durante le trasmissioni in alcune frequenze. E' causato da accensioni/spegnimenti transitori all'interno della rete

2.3 Physical Layer

Riguardo il livello fisico, le tecniche di modulazione finora sperimentate per i sistemi power line sono le modulazioni a portante singola, modulazioni di tipo "spread spectrum" (a spettro espanso) e OFDM (acronimo di Orthogonal Frequency Division Multiplexing) multi portante. Segue ora una breve trattazione delle tre tipologie [23], e in figura 2.3 una tabella riassuntiva e comparativa delle caratteristiche delle varie soluzioni; esse sono schematizzate nella figura 2.2.

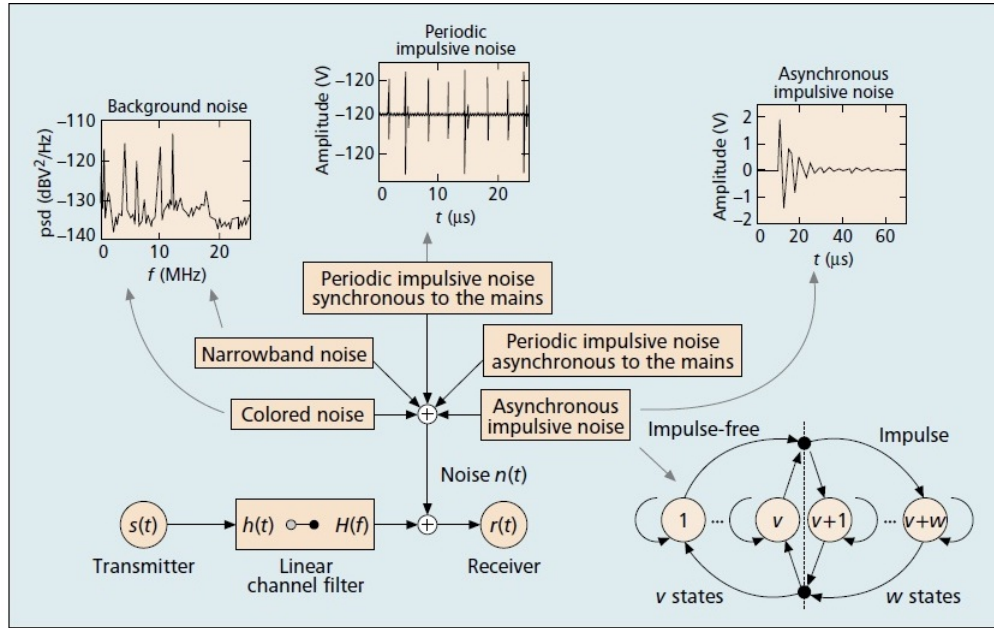


Figura 2.1: Modello del canale power line e del suo rumore; tratta da [23]

- Modulazioni a portante singola: in tali modulazioni, che utilizzano una sola portante a frequenza f_0 , l'informazione è contenuta nell'ampiezza, nella fase, o nel cambiamento di frequenza di tale portante; attorno a f_0 può essere generato un segnale di larghezza di banda più o meno ampia. Un modo di caratterizzare una modulazione è mediante l'efficienza spettrale, cioè il numero di bit al secondo che possono essere trasmessi in una banda di 1Hz: l'obiettivo è raggiungere la massima efficienza spettrale, ma le modulazioni a portante singola non raggiungono valori superiori a 1 (bit/s) x Hz. Inoltre, con elevati data rate, si generano più segnali a banda larga centrati sulla frequenza principale, ed a causa delle caratteristiche peculiari del canale power line, con tali segnali si ottengono prestazioni molto basse: si rendono necessari dei costosi equalizzatori di canale, ma così facendo viene meno il vantaggio della semplicità delle modulazioni a portante singola, rendendone l'uso poco conveniente e poco efficace per le comunicazioni power line.
- Modulazioni a spettro espanso (spread spectrum): esse sembrano essere una buona soluzione in ambito power line, grazie alla loro immunità alle attenuazioni selettive e a tutti i tipi di interferenza in banda stretta (narrowband); inoltre, il segnale trasmesso presenta una PSD molto bassa. Come si vede in figura 2.2, si utilizza una singola portante comune centrata in f_0 , e mediante un procedimento di espansione, per i dettagli del quale si rimanda a [23], si costruisce una banda molto più ampia di quella del segnale originario. Se un'interferenza in banda stretta si presenta al ricevitore, grazie al procedi-

mento di espansione, essa occupa soltanto una piccola parte della larghezza di banda del segnale. Da notare però che poiché ogni utente del sistema occupa tutta la banda di frequenze, il rumore di fondo aumenta anche per tutti gli altri, così aumenta la probabilità di disturbo reciproco: perciò c'è un trade-off tra la qualità del servizio e il numero di utenti che lo utilizzano.

- **Modulazione OFDM:** tale modulazione appartiene alla tipologia multi portante, e ad oggi ha molte applicazioni in svariati ambiti, come le trasmissioni digitali terrestri (DVB-T, acronimo di Digital Video Broadcasting-Terrestrial), e le linee ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line). Come per le modulazioni a spettro espanso, anche l'OFDM risulta robusto nei confronti di vari tipi di interferenze. Lo spettro di frequenze usato dall'OFDM è diviso in vari sottocanali, in ciascuno dei quali viene trasmessa una portante, e tutte le portanti sono ortogonali tra loro. Grazie alla proprietà dei canali a banda stretta, l'attenuazione è costante all'interno di ogni canale, e l'equalizzazione risulta semplice; inoltre, l'ortogonalità delle portanti incrementa molto l'efficienza spettrale, elemento chiave delle power line ad alta velocità. E' importante segnalare che per ogni portante utilizzata si può stabilire un diverso tipo di modulazione, a seconda delle caratteristiche del sottocanale su cui viene trasmessa: tale adattabilità è uno dei punti di forza dell'OFDM; infine, il fatto che alcuni range di frequenze siano evitati nelle comunicazioni su power line può facilmente essere implementato, azzerando le portanti corrispondenti.

2.4 Data Link Layer

Il livello Data Link, in particolare il sottolivello di accesso al mezzo (MAC, acronimo di Medium Access Control) gestisce l'accesso al mezzo di trasmissione da parte di più utenti. I protocolli di livello MAC possono essere di due tipologie [22]: ad accesso fisso o ad accesso dinamico. I protocolli ad accesso fisso prevedono di assegnare le risorse del canale a ciascun utente in modo predeterminato, senza considerare la necessità di tale utente di trasmettere o meno in certo momento: essi perciò non sono adatti alle trasmissioni su power line, a causa della variabilità e dei picchi di traffico che si verificano. Tra i protocolli ad accesso dinamico, segnaliamo il Polling e l'Aloha; il Polling prevede che gli utenti vengano abilitati a trasmettere uno alla volta, in un ordine predefinito, ma solo se hanno dati da trasmettere, mentre l'Aloha prevede che ogni utente, senza alcun controllo, trasmetta dati se ne ha la necessità, con elevato rischio di collisioni dei pacchetti. Il primo protocollo risulta inefficiente in caso di traffico asimmetrico o in seguito a cambiamenti topologici della rete power line, mentre l'Aloha ha un throughput molto basso in presenza di traffico elevato. Un altro protocollo ad accesso dinamico proposto per le power line communications è il Carrier Sense Multiple Access (CSMA). Il CSMA prevede che ogni utente che deve trasmettere verifichi la disponibilità del canale

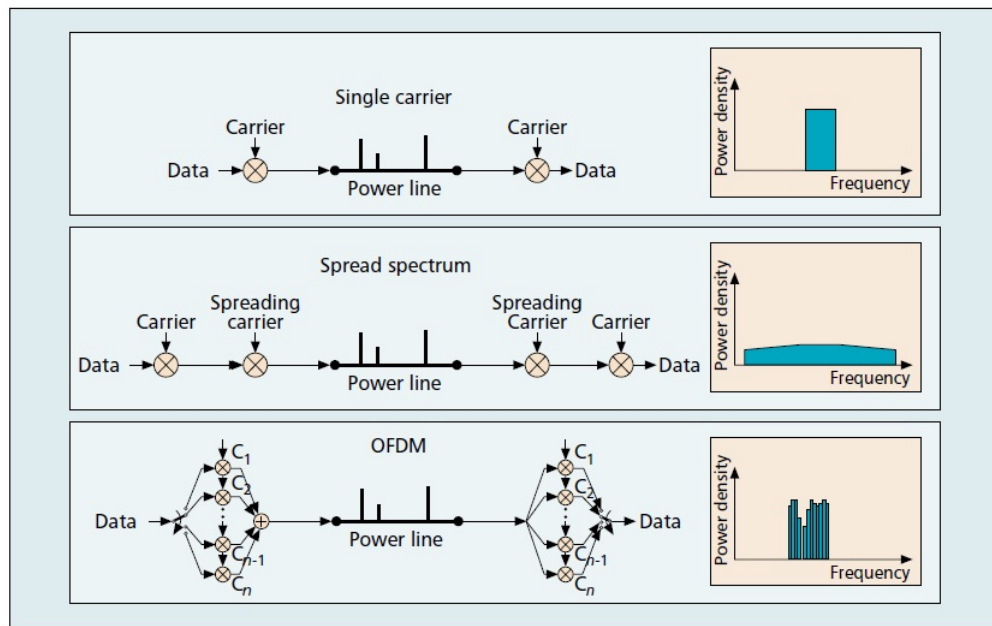


Figura 2.2: Schemi delle tipologie di modulazioni proposte; tratta da [23]

Modulation scheme	Spectral efficiency in $\text{b/(s} \cdot \text{Hz)}$	Max. data rate in Mb/s	Robustness against channel distortions	Robustness against impulsive noise	Flexibility and adaptive features	System costs	EMC aspects, regulation
Spread spectrum techniques	< 0.1	≈ 0.5	–	0	--	--	+
Single-carrier broadband, no equalizer	1–2	< 1	--	+	--	++	--
Single-carrier broadband with equalizer	1–2	≈ 2	+	+	0	–	–
Multicarrier broadband with equalizer	1–4	≈ 3	+	0	0	–	0
OFDM	$>> 1$	> 10	++	0	++	–	+

Figura 2.3: Tabella comparativa con i dettagli tecnici delle varie modulazioni; tratta da [23]

prima di avviare la trasmissione; esso è vantaggioso soprattutto per i bassi costi di implementazione. Esistono due varianti migliorative del CSMA: collision detection (CSMA/CD) e collision avoidance (CSMA/CA). Il primo verifica la presenza di collisioni dopo aver trasmesso, e se sono avvenute, ritrasmette i pacchetti: nelle power line, tuttavia ciò non è efficace, poiché la grande variabilità dei segnali ricevuti e dei livelli di rumore rende difficoltoso e inaffidabile il riconoscimento delle collisioni. La variante CSMA/CA differisce dalla precedente poiché attende un tempo casuale prima di trasmettere un pacchetto anche se il canale è verificato essere libero. Il CSMA/CA è stato scelto come protocollo di livello MAC per lo standard Homeplug [22].

2.5 Esempi di applicazioni

Seguono ora due esempi di strutture implementabili all'interno di reti smart grid e basate su power line communications.

2.5.1 Il sistema REMPLI

Il Real-time Energy Management over Power-Lines and Internet (REMP LI) [28], risalente al 2003, è stato il primo progetto in cui si è utilizzato l'OFDM per la modulazione nelle power line communications di tipo narrowband; ne evidenzieremo di seguito alcuni aspetti, tratti da [15], al quale si rimanda per la trattazione completa. Il sistema REMPLI è una struttura finalizzata alle comunicazioni real-time ai fini di monitoraggio da remoto. Le reti power line, precedentemente classificate in base alla banda di frequenze operative, si possono classificare anche in base al voltaggio: quelle a voltaggio più elevato trasmettono l'energia a lunga distanza, e quelle a voltaggio più basso sono usate per la distribuzione nelle aree più piccole. Il progetto REMPLI coinvolge gli ultimi livelli della rete di distribuzione. Nelle connessioni tra reti a medio voltaggio e basso voltaggio sono presenti un trasformatore e un Bridge REMPLI per la trasmissione dei dati; all'ingresso della rete a medio voltaggio, invece, è collocato un Access Point REMPLI che collega la rete power line a un trasmettitore dati a banda larga. Le comunicazioni tra dispositivi nel sistema REMPLI sono gestite, al livello MAC mediante protocollo Time Division Multiple Access (TDMA) master/slave. Riguardo invece il livello rete (Network Layer), esso supporta multicast e broadcast, e servizi di gestione automatica dei collegamenti con i terminali slave. Infine, riguardo il livello di trasporto (Transport Layer) del sistema REMPLI, schematizzato in figura 2.5, ne è brevemente illustrato per completezza il componente fondamentale, ovvero il transport route manager (TRM). Esso si occupa sia della fase di start-up del sistema sia della determinazione automatica delle rotte; riguardo la seconda fase, si tratta di determinare quali percorsi devono fare i dati inviati dagli access point ai nodi: nel sistema REMPLI, per semplicità, tutti i pacchetti relativi a una particolare istan-

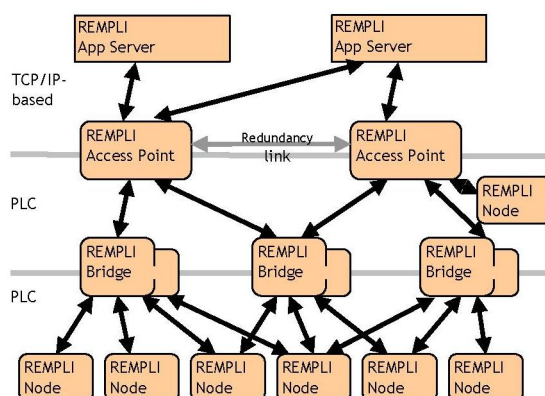


Figura 2.4: Diagramma ad albero del sistema REMPLI; tratta da [15]

za inviata dall'access point seguono lo stesso percorso; così facendo, essi sono gli unici dispositivi che gestiscono il routing dei dati, e lo fanno una sola volta per ogni istanza "richiesta/risposta"; il TRM tiene traccia dei possibili percorsi tra tutti i nodi e i vari access point in una lista denominata "connected node list". Il criterio con cui l'access point sceglie la rotta da intraprendere è basato sulla valutazione del "costo" di quel percorso. Per stimare questo valore, il sistema di trasporto valuta i seguenti parametri: qualità dei collegamenti access point/bridge, qualità dei collegamenti tra i nodi e stato della coda nei bridge. La figura 2.4 illustra lo schema dei collegamenti dei dispositivi nell'architettura REMPLI.

2.5.2 Il sistema PRIME

Il progetto Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME) [18], nato nel 2007 e ultimato nel 2010, è un'iniziativa della società spagnola Iberdrola, la più grande azienda produttrice e distributrice di elettricità della Spagna; l'intenzione fu di definire una struttura che implementasse lo stato dell'arte delle tecnologie riguardanti sia il livello fisico della rete sia il livello di accesso al mezzo (MAC), per garantire basi solide sulla strada dell'evoluzione delle smart grid. Tale iniziativa ha già ricevuto il consenso di numerose società del settore tecnologico, come STMicroelectronics. Le aziende coinvolte nel progetto PRIME sono di tre tipologie: costruttori di misuratori elettronici di corrente, provider di servizi di telefonia che offrono supporto nel settore delle telecomunicazioni, e industrie dei semiconduttori. L'architettura del sistema PRIME è composta di varie sottoreti, ognuna delle quali ha due tipi di nodi: i nodi base e i nodi di servizio; i primi sono le "radici" dell'albero che costituisce la sottorete, e forniscono connettività ad essa, oltre a gestirne le risorse; c'è un solo nodo base per ogni sottorete. Le "foglie" dell'albero sono i nodi di servizio, ognuno dei quali è un'entità della sottorete, che si auto configura per la comunicazione con il nodo base. Sono approfondite

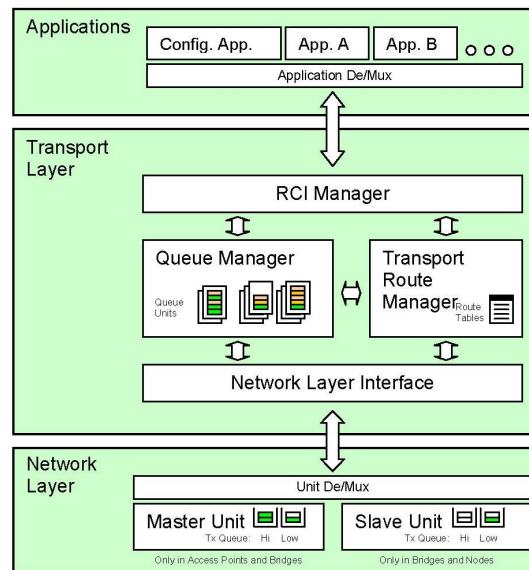


Figura 2.5: Schema a blocchi dei più alti livelli della pila ISO/OSI del sistema REMPLI; tratta da [15]

ora le caratteristiche del livello fisico del sistema PRIME [21]: esso in origine è stato progettato per gestire comunicazioni su power line a frequenze di 50-60 Hz AC, poiché frequenze più alte presentavano problemi implementativi. L'ostilità intrinseca al mezzo di trasmissione power line è già stata trattata, e i creatori di PRIME hanno optato per uno schema di modulazione basato su OFDM. Un punto cruciale nel progetto fu la scelta di una banda di frequenze che avesse prestazioni accettabili nella trasmissione su power line e che in futuro garantisse di non essere impiegata per altri servizi (come la radio): tali esigenze furono soddisfatte dalla scelta della banda CENELEC-A [6], riservata alle power line europee e con un range di frequenze dai 3 ai 95 kHz, diviso in 96 sottoportanti, che usano in maniera adattiva schemi di modulazione BPSK, QPSK e 8PSK, per ottenere le migliori prestazioni nel livello fisico. Riguardo il livello MAC, esso è progettato per una configurazione delle connessioni di tipo master/slave, e ottimizzato per power line a basso voltaggio. Un sistema di indirizzamento specifico identifica le sottoreti e i diversi tipi di nodi, e gestisce le connessioni, permettendo comunicazioni multicast e broadcast. La necessità di mantenere i ritardi minimi nelle comunicazioni real time ha fatto ricadere la scelta nel protocollo CSMA/CA, ad accesso casuale, nella versione migliorata per la gestione delle collisioni. Inoltre, è presente un sistema di gestione delle ritrasmissioni del tipo Automatic Repeat reQuest (ARQ) [26]. Infine, per garantire privacy e integrità dei dati, all'interno del sistema essi vengono trasmessi con una cifratura a 128 bit di tipo Advanced Encryption Standard (AES) [27]. Il sistema PRIME, in conclusione, fornisce una buona base di partenza

per comunicazioni su power line ad alte prestazioni, adatte alle reti smart grid, in particolar modo per le applicazioni di misurazione (AMI).

Capitolo 3

Il routing su reti smart grid con power line

3.1 Punti cruciali e classificazione delle sottoreti

L'analisi del problema del routing per le power line communications richiede una classificazione dimensionale preliminare dei vari tipi di reti che compongono una smart grid [5]:

- Home Area Network (HAN): riguarda le utenze finali, e fornisce le funzionalità usate nelle abitazioni; ogni strumento all'interno di esse invia i dati delle misurazioni dell'energia sulla rete al gateway usato per le applicazioni AMI; questo tipo di reti gestisce anche l'automazione domestica, permettendo di aumentare confort ed efficienza energetica, mediante l'uso di sensori e attuatori, ad esempio per il controllo dell'illuminazione o dei sistemi di sicurezza. Nelle reti HAN, le comunicazioni wireless sono preferite rispetto ai cavi per la flessibilità di inserimento/rimozione di dispositivi nella rete, oltre che per i costi infrastrutturali molto inferiori; i dispositivi che trasmettono dati all'interno delle HAN possono essere classificati in:
 - dispositivi “small load”: lampadine, caricabatterie, pc portatili; data l'incidenza ridotta di questi strumenti nel complesso della rete, è sufficiente, per il centro di controllo, sapere quali sono accesi e quali spenti
 - dispositivi “uncontrollable large load”: ad esempio, la stufa; essendo strumenti utilizzati solo in caso di bisogno, risultano impossibili da controllare, e quindi sono assimilabili ai precedenti dal punto di vista delle informazioni di monitoraggio
 - dispositivi “controllable large load”: ad esempio condizionatori d'aria, lavatrici e asciugatrici; il centro di controllo richiede, per questi strumenti, informazioni dettagliate come durata di utilizzo, potenza impiegata etc.

- veicoli elettrici (EVs): per questi ultimi, è fondamentale gestire la carica in anticipo, data la grande potenza richiesta; è chiaro quindi che relativamente a questi dispositivi, la comunicazione di dati al centro di controllo è di primaria importanza

La copertura delle reti HAN è dell'ordine delle decine di metri quadrati, e il loro data rate è tipicamente basso, tipicamente da 1 a 10 Kbps; tra i protocolli per le HAN, ricordiamo l'IEEE 802.11, noto come WiFi [38], e HomePlug per le PLC.

- Neighbourhood Area Network (NAN): queste reti connettono gli smart meters agli access point locali per applicazioni AMI; esistono reti di smart meters che formano una topologia mesh, o parte di una rete mesh, dove si trovano anche dei gateway per trasmettere dati. La copertura delle reti NAN va circa da 1 a 10 miglia quadrate; il data rate è superiore a quello delle HANs e ha un range tra 10 e 1000 kbps; infine, tra i protocolli per queste reti, che possono essere sia wireless che cablate, ricordiamo il WiMAX [29] e gli standard per la telefonia mobile come 3G [39] e LTE [30], oltre ovviamente alle PLC.
- Wide Area Network (WAN). Queste reti permettono la comunicazione con i centri di gestione dei servizi. Esse comprendono due tipi di reti: Core e Backhaul; la Core network è usata per collegare le reti metropolitane alle stazioni secondarie, la Backhaul Network connette la NAN alla Core network; la copertura di queste reti è dell'ordine delle centinaia di miglia quadrate, e i data rates vanno da 10 a 100 Mbps.

La figura 3.1 rappresenta la struttura di una smart grid mediante blocchi funzionali, mentre la figura 3.2 evidenzia i vari tipi di reti sopra citati in una struttura che ne chiarisce le relazioni.

In generale, la progettazione di algoritmi di routing per le smart grid deve tenere conto di alcune caratteristiche intrinseche di tali reti [5]:

- eterogeneità dei nodi e interoperabilità: la varietà di dispositivi che compongono una smart grid (computer, router, switch, sensori etc.) dà origine a una grande diversità di tecnologie di comunicazione, e di conseguenza diverse esigenze di routing; ogni nodo all'interno della rete dovrà quindi avere un certo numero di interfacce che gli permettano di gestire la diversità delle tecnologie di trasmissione
- posizionamento dei nodi e dinamiche di rete: la topologia di una rete è basata sulla posizione dei nodi, e decidere la posizione anche di un semplice sensore all'interno di essa può avere ripercussioni sulle prestazioni, dovute alla qualità del segnale e ad eventuali interferenze. Inoltre alcuni elementi mobili della rete, come i veicoli elettrici, vanno opportunamente gestiti

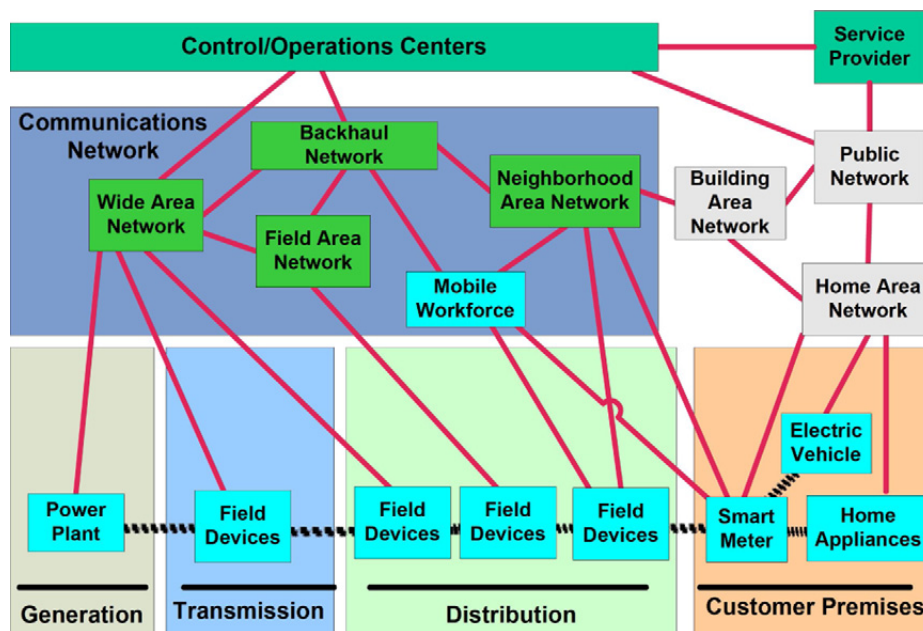


Figura 3.1: Schema di una smart grid secondo i suoi blocchi funzionali; tratto da [5]

- sicurezza e privacy [31]: molti strumenti della smart grid che si occupano della distribuzione e generazione dell'energia sono localizzati in un ambiente aperto e potenzialmente insicuro; questi dispositivi devono essere protetti da accessi indesiderati, poiché potrebbero avere gravi conseguenze, dovute ad esempio alla modifica delle routing tables, le tabelle che permettono di istradare i pacchetti in un determinato percorso, determinato dalla posizione dei nodi vicini a quello dove si trova un determinato pacchetto. Inoltre, un altro problema è quello della privacy relativa all'energia distribuita; alcuni utenti potrebbero non gradire la divulgazione dei dati sui loro consumi, o la posizione del loro veicolo elettrico. Questo comporta l'implementazione di soluzioni aggiuntive anche relativamente al routing: ad esempio, se un utente non volesse far gestire la fatturazione dei consumi all'ente che distribuisce l'energia, i suoi dati dovrebbero essere reindirizzati a una seconda destinazione che provveda al servizio
- Quality of Service (QoS) [33]: QoS significa garanzia, da parte della rete, di fornire le prestazioni dichiarate, in termini ad esempio di larghezza di banda, affidabilità, ritardo etc. ed è un elemento importante anche nelle smart grid; ad esempio, ogni tecnologia wireless ha il proprio QoS, che impatta sulle prestazioni dei protocolli di routing; in conclusione, si richiede un approccio cosiddetto di cross layer design, che prende in considerazione le problematiche del livello applicazione, in parallelo a quelle del livello fisico e del livello MAC

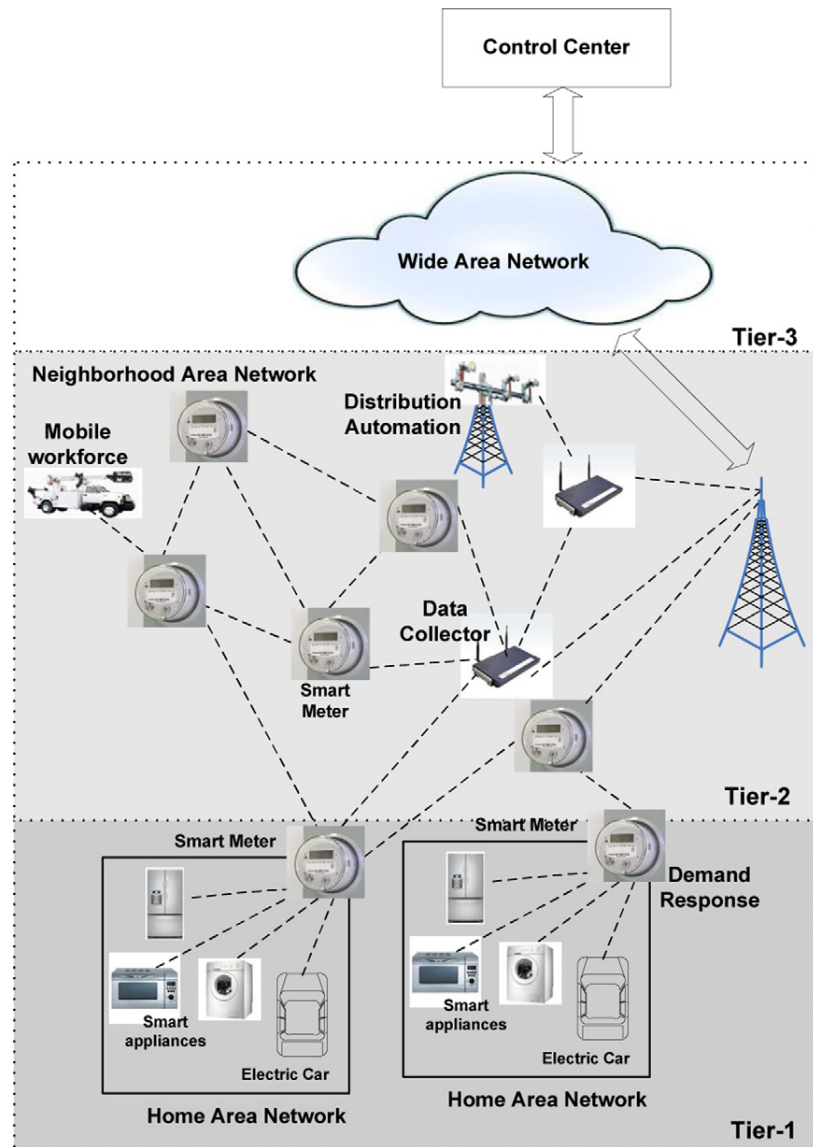


Figura 3.2: Schema delle sottoreti che compongono una smart grid e delle loro relazioni; tratto da [5]

- scalabilità [32]: essa è un elemento chiave per le smart grid; ad esempio, si hanno milioni di misuratori collegati alla rete che trasmettono informazioni, aree con un numero di nodi molto più elevato di altre, e i protocolli di routing devono essere in grado di adattarsi alla scalabilità intrinseca della rete; scoperta delle rotte, sicurezza e altri fattori si complicano rapidamente al crescere delle dimensioni della rete

Gli algoritmi di routing per le smart grid sono classificabili, in prima approssimazione, in base al tipo di tecnologia per la quale sono progettati: wireless o cablata; in questa tesi sarà trattata la seconda categoria, che si riferisce appunto a trasmissioni su power line. Ora la trattazione si focalizzerà sull'analisi di alcuni algoritmi di routing usati su determinati tipi di reti con tecnologia power line. Le tipologie di reti power line che tratteremo sono le seguenti: reti HAN PLC, reti HAN ibride e reti NAN PLC.

3.2 Routing in reti Home Area Network su PLC

Per le reti HAN, saranno esposte le caratteristiche e le prestazioni dell'algoritmo denominato Adaptive Channel State Routing (ACSR) [7]: il confronto prestazionale è stato svolto rapportandone le prestazioni all'algoritmo Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) [8], quest'ultimo nato in realtà per l'utilizzo su reti ad hoc, e non come soluzione dedicata specificatamente alle power line communications. Il confronto è sensato, poiché alcune caratteristiche del canale power line sono assimilabili a quelle dei sistemi MANET (Mobile Ad-hoc Networks) e in generale delle reti wireless. In particolare, gli aspetti salienti dei sistemi MANET sono:

- topologia dinamica: la topologia della rete può cambiare repentinamente, ed è costituita da link mono e bi direzionali
- collegamenti wireless, con capacità ridotta rispetto a soluzioni cablate
- soluzioni per l'ottimizzazione dell'energia: molti nodi sono infatti alimentati a batteria
- sicurezza: nei sistemi wireless rimane un punto critico

3.2.1 Algoritmo Adaptive Channel State Routing (ACSR)

Questo algoritmo si basa sulla conoscenza dello stato della rete power line mediante due distinte metriche: "channel state indicator" (CSI) e distanza [7]. Il primo indice è utilizzato per misurare quanto stabile è il canale tra due nodi, e varia a seconda delle informazioni che vengono ricevute dalla ricezione di pacchetti specifici, detti "routing information packets". Inizialmente il valore del CSI è zero, e viene

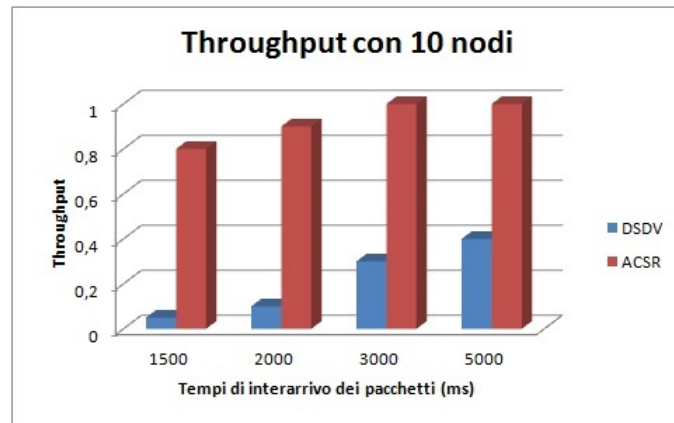


Figura 3.3: Throughput in funzione dei tempi di interarrivo, con 10 nodi; tratta da [7]

incrementato ogni volta che un nodo riceve uno di questi pacchetti da un nodo vicino (periodicamente), così come viene decrementato se si verifica la perdita di uno di tali pacchetti: tale meccanismo permette di quantificare la stabilità del canale, giudicato stabile se il CSI supera un certo valore. La seconda metrica, la distanza, indica se il canale è simmetrico oppure no, e indica anche se un nodo è direttamente raggiungibile o è richiesto un nodo ripetitore: se due nodi si trovano a distanza “1”, significa che il percorso tra di essi è simmetrico e possono scambiarsi direttamente i pacchetti; se l’indice in questione invece è maggiore di “1”, sarà necessario l’ausilio di nodi ripetitori per lo scambio di pacchetti; per inciso, distanza infinita significa che il percorso tra due nodi è sconosciuto o asimmetrico. Nel caso un percorso tra un nodo “sorgente” e un nodo “destinazione” sia sconosciuto o instabile, il nodo sorgente invia il pacchetto in modalità broadcast, a tutti i nodi: tale tecnica è nota come flooding; è importante sottolineare che il flooding, in una vasta rete, causa intenso aumento del traffico e di conseguenza le prestazioni tendono a degradare: l’ACSR introduce una miglioria in questo frangente, che consiste in un metodo di flooding probabilistico, per i dettagli del quale si rimanda a [7]. L’algoritmo ACSR utilizza le routing tables: ogni nodo della rete possiede la propria tabella, e la aggiorna periodicamente usando il routing information packet. Nella routing table, una volta completata, saranno memorizzate le distanze minime verso tutti i nodi raggiungibili: da notare il fatto che se le informazioni di routing relative a un nodo non vengono aggiornate entro un certo tempo massimo, ad esempio a causa di perdita di pacchetti o congestione della rete, tali informazioni sul percorso verso tale nodo vengono rimosse dalla tabella; nell’eventualità che un nodo debba spedire pacchetti ad una destinazione rimossa dalla routing table, tale nodo invierà i pacchetti in modalità flooding probabilistico.

Le prestazioni dell’algoritmo ACSR saranno confrontate con quelle dell’algoritmo DSDV, più datato ma anch’esso basato su routing table, tuttavia sprovvisto delle capacità di channel sensing dell’ACSR. Poiché quest’ultimo è più recente e

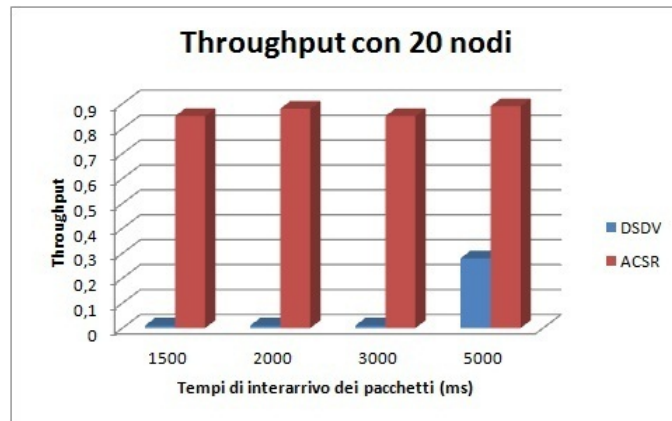


Figura 3.4: Throughput in funzione dei tempi di interarrivo, con 20 nodi; tratta da [7]

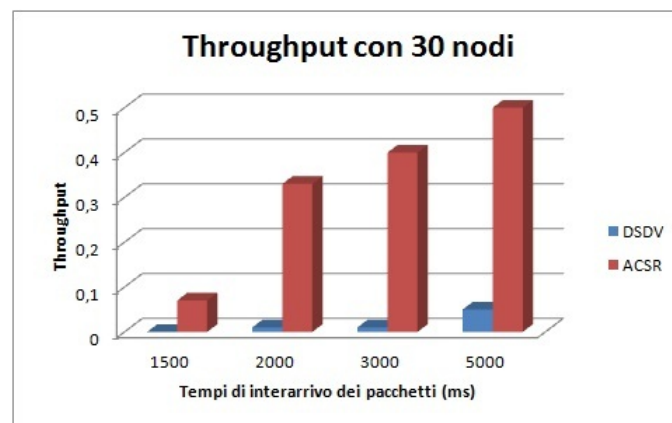


Figura 3.5: Throughput in funzione dei tempi di interarrivo, con 30 nodi; tratta da [7]

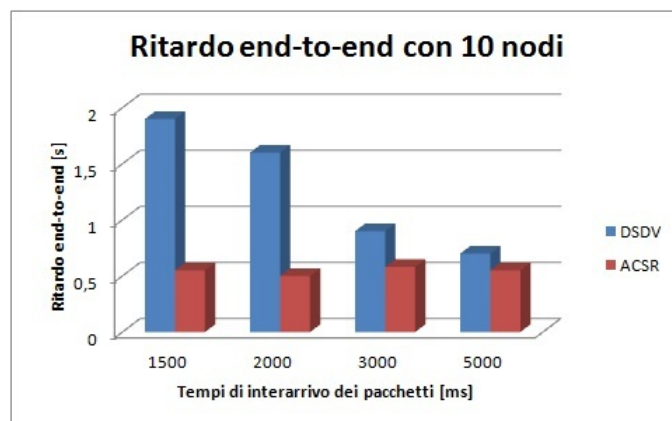


Figura 3.6: Ritardo end-to-end in funzione dei tempi di interarrivo, con 10 nodi; tratta da [7]

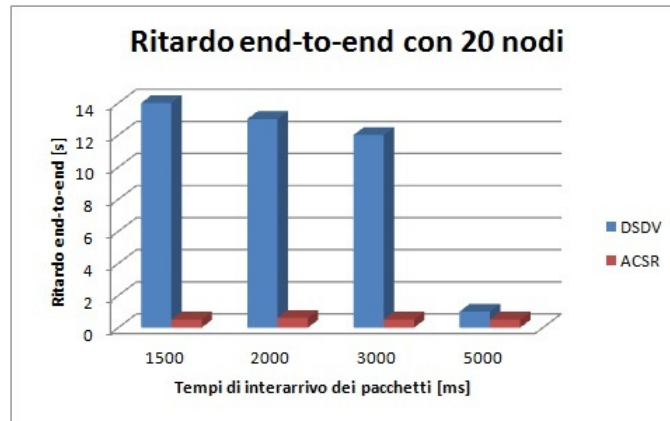


Figura 3.7: Ritardo end-to-end in funzione dei tempi di interarrivo, con 20 nodi; tratta da [7]

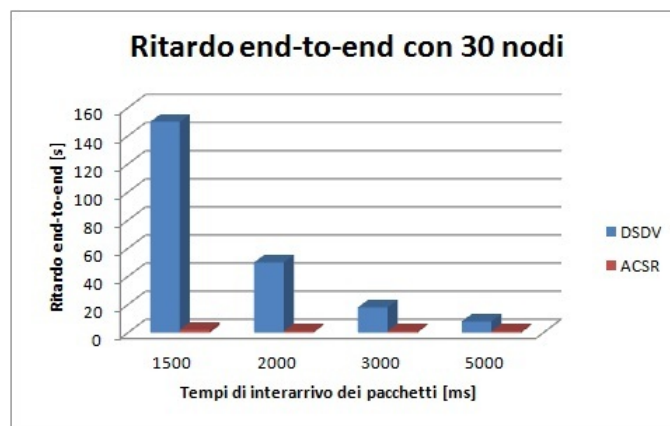


Figura 3.8: Ritardo end-to-end in funzione dei tempi di interarrivo, con 30 nodi; tratta da [7]

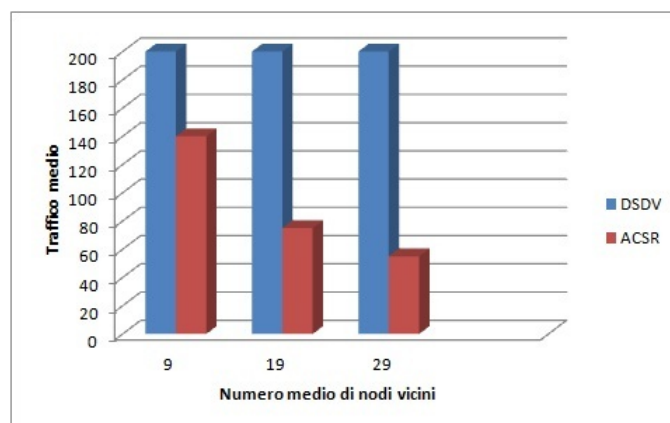


Figura 3.9: Traffico medio in funzione del numero medio di nodi; tratta da [7]

migliore dal punto di vista prestazionale, sarà tralasciata la spiegazione dettagliata dell'algoritmo DSDV, per la quale si rimanda a [8]. Per testare le prestazioni dell'algoritmo ACSR, i test presentati in [7] si basano su un sistema PLC che è simile a una situazione domestica o un ufficio: il Packet Error Rate (PER) è risultato molto elevato, e si è potuta testare l'efficacia dell'ACSR nel riconoscere l'instabilità del canale e migliorare le prestazioni. Lasciando al lettore libertà di consultazione dei dettagli tecnici dell'infrastruttura e della strumentazione necessaria per questo test [7], seguiranno ora solo i risultati sperimentali che evidenziano le prestazioni dell'ACSR, anticipati solo da definizioni necessarie alla comprensione di tale analisi:

- throughput = numero pacchetti ricevuti / numero pacchetti trasmessi
- ritardo end-to-end = tempo totale esperimento / numero pacchetti ricevuti x tempi di interarrivo
- traffico medio = totale di traffico generato / numero totale di nodi nella rete

Dai risultati esposti nei grafici di figura 3.3...3.9 si evince il fatto che l'ACSR ha performance superiori al DSDV, in termini di throughput e ritardo, e il divario prestazionale aumenta se il numero di nodi cresce, a causa del collo di bottiglia che si crea nel DSDV in presenza di percorsi asimmetrici o instabili. Infine si nota come il flooding probabilistico usato nell'ACSR sia più efficace del flooding tradizionale del DSDV nel ridurre il traffico.

3.3 Cenni al routing su reti HAN ibride

L'utilizzo di rete ibride che uniscono tecnologia wireless e PLC nell'automazione domestica è votato ad aumentare l'affidabilità e creare eterogeneità nelle tipologie di percorso. Di seguito saranno trattati tre approcci differenti in questo ambito [5], senza analizzare nello specifico gli algoritmi che si riferiscono a questa tipologia di reti, dato che non impiegano esclusivamente power line: per approfondimenti dettagliati a riguardo, si consulti la bibliografia dell'articolo [5].

- INSTEON: è uno standard che si riferisce a una rete a topologia MESH ibrida che utilizza RF (Radio Frequency) e PLC per automazione domestica; la trasmissione di messaggi avviene grazie a un meccanismo detto "simulcast": quando un nodo (che può essere un dispositivo RF, un dispositivo PL, o un terminale ibrido) invia un messaggio, i nodi vicini (all'interno del suo range di trasmissione) lo ritrasmettono entro un certo tempo, fissato da slot temporali. Quando un dispositivo ibrido riceve un messaggio e ha necessità di ritrasmettere, al primo slot trasmetterà mediante la tecnologia complementare a quella usata dal nodo che lo ha spedito, al secondo slot invece usa l'altra metodologia: così facendo, se un nodo ibrido riceve un messaggio attraverso

la power line, ritrasmetterà prima via RF e poi via power line, ottenendo così l'eterogeneità dei percorsi prima accennata. Per evitare congestioni della rete dovute a trasmissioni broadcast, INSTEON usa due campi nei pacchetti che trasmette: "max hops" stabilisce il massimo numero di nodi che può attraversare quel pacchetto, pari a quattro, e "hop left" è usato per stabilire la decisione successiva: un nodo è trasmesso se il suo valore di "hop left" è maggiore di zero, e ogni volta che viene ritrasmesso tale valore cala di uno.

- reti PLC-ZigBee: sono una soluzione che combina reti PLC e wireless ZigBee [40]; implementa algoritmi di routing quali "flooding" e Ad hoc On Demand distance Vector (AODV) [34], con alcune modifiche specifiche. Per questo tipo di reti si usano tre strategie di routing : joint path (percorso congiunto), backbone based e dual path (doppio percorso). La prima è la strategia base, che crea percorsi che usano entrambe le reti, plc e wireless, per raggiungere una determinata destinazione; la seconda invece sceglie di trasmettere prima su powerline, poi eventualmente in wireless; l'ultima permette ai nodi di ricevere pacchetti che provengono o da un percorso wireless della rete o da uno backbone-based. I risultati sperimentali [25] dimostrano che le soluzioni dual path e backbone based sono migliori di quelle joint path, e che in termini di overhead della rete e latenza il flooding ha prestazioni superiori all'AODV; una rete ibrida di questo tipo presenta infine un overhead più basso rispetto a una soluzione totalmente cablata o totalmente wireless.
- reti ibride RF IPv6 e PLC: una soluzione di questo tipo è adatta all'implementazione negli "smart buildings", edifici dotati di sistemi tecnologici centralizzati su reti di ultima generazione; l'architettura proposta in [24] è composta da nodi RF, nodi PLC e gateway RF-PLC; questi ultimi utilizzano il protocollo 6LowPAN route-over [41] per garantire l'interazione tra RF e PLC, a sua volta basato sul protocollo RPL (che non sarà trattato in questa tesi e per il quale si rimanda a [5]) e che utilizza come metrica di routing il consumo di energia nei nodi: viene selezionata cioè la rotta a minor consumo di energia. I gateway RF-PLC sono posizionati in modo che ogni nodo RF possa raggiungere in un singolo passo (single hop) un gateway, che a sua volta invia i dati nell'infrastruttura PLC. I risultati delle simulazioni [24] mostrano che all'aumentare del numero di gateway RF-PLC diminuisce la latenza e si riduce la perdita dei pacchetti.

3.4 Routing in reti Neighbourhood Area Network su PLC

Si ricorda che tali reti connettono gli smart meters, i misuratori, agli access point locali, per applicazioni AMI. La tipica struttura delle reti elettriche è a bus o ad albero [5]. Nelle reti con topologia ad albero, in figura 3.10, il trasformatore MV/LV (medio voltaggio/basso voltaggio) è localizzato alla radice; il centro di raccolta

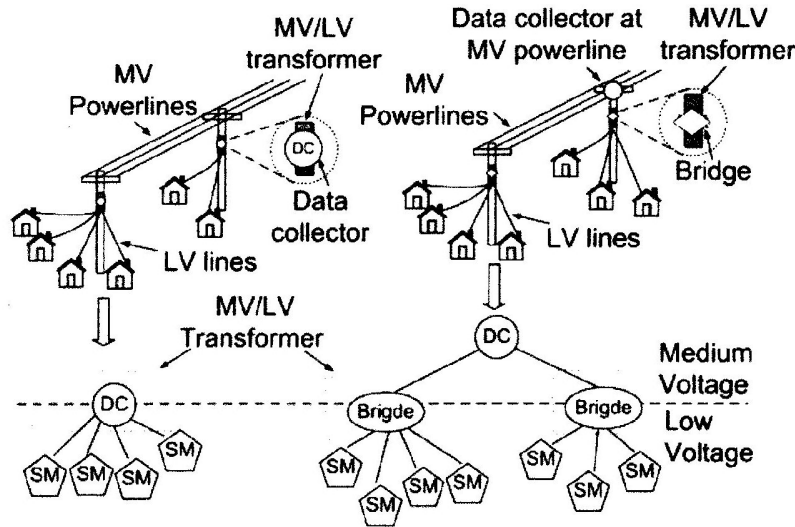


Figura 3.10: Struttura di una rete power line ad albero; tratta da [5]

dati, che raccoglie le informazioni trasmesse dai misuratori, può essere esso stesso localizzato sul trasformatore MV/LV. Per raggiungere il centro di raccolta dati, i misuratori hanno necessità di un percorso che permetta il trasferimento dei dati, ed è necessario tenere conto delle distanze che hanno i misuratori dalla destinazione, oltre all'ostilità del mezzo di trasmissione. Oltretutto è necessario considerare i cambiamenti topologici che possono avvenire nella rete: per tali ragioni, anche per le reti NAN esistono algoritmi derivati dalle reti wireless, che saranno analizzati in seguito, per poi esporre una soluzione specificatamente creata per l'utilizzo su reti power line.

3.4.1 Algoritmi derivati dalle reti wireless

3.4.1.1 Algoritmo Improved On-Demand Distance Vector (IPODV)

L'algoritmo Improved On-demand Distance Vector (IPODV) [10] è di tipo "on demand", cioè determina il percorso verso una destinazione solo su richiesta, al contrario dei protocolli di tipo "proactive" che invece individuano nodi e percorsi indipendentemente dal loro utilizzo; le rotte sono mantenute per il tempo necessario al nodo sorgente, e ogni nodo ha una propria routing table, aggiornata mediante la periodica trasmissione broadcast di appositi pacchetti. Rispetto all'algoritmo Ad-Hoc On Demand Distance Vector (AODV) [34] su cui si basa i miglioramenti dell'IPODV riguardano il meccanismo di manutenzione dei percorsi e la gestione delle routing tables [10].

- Miglioramenti riguardanti il meccanismo di manutenzione dei percorsi: in AODV, periodicamente vengono inviati messaggi “HELLO” per l’aggiornamento delle routing tables, che generano però un pesante overhead; l’algoritmo IPODV riduce al minimo l’invio di questi pacchetti, e di seguito sono elencate le situazioni in cui l’algoritmo si comporta diversamente dal predecessore AODV:
 - Un pacchetto dati viene inviato appena dopo un messaggio HELLO: in questo caso si convalida il pacchetto dati, e quello HELLO viene scartato; dopo ciò i nodi che lo hanno ricevuto aggiornano le loro routing tables.
 - Un pacchetto dati viene inviato molto tempo dopo un messaggio HELLO: il pacchetto dati e quello HELLO vengono processati normalmente.
 - Se nessun pacchetto dati viene inviato nel periodo di HELLO, ed esistono celle valide (percorsi che portano ad altri nodi) nella routing table, viene spedito broadcast un pacchetto di risposta, detto “route reply” (RREP): i nodi che lo ricevono aggiornano la propria tabella, e si ha la conferma che il link è bidirezionale.
 - Se nessun pacchetto dati è inviato nel periodo di HELLO, e non ci sono celle valide nella routing table, viene inviato un normale pacchetto HELLO.
- Miglioramenti relativi alla gestione routing tables. Gli errori nelle comunicazioni power line aumentano all’aumentare della distanza: in generale, il link tra nodi adiacenti è affidabile se la topologia rimane inalterata per un lungo periodo di tempo. All’interno di IPODV è stato progettato un algoritmo per memorizzare la qualità di un certo link contando il numero di pacchetti HELLO ricevuti: meno pacchetti sono stati ricevuti, più bassa è considerata la qualità di quel collegamento. La entry relativa a un nodo viene cancellata dalla tabella se il nodo è perso o la qualità del percorso che porta ad esso è troppo bassa. Il fatto che i nodi instabili abbiano una bassa probabilità di essere attivi nel calcolo dei percorsi, riduce l’overhead e il ricalcolo delle rotte: tutto ciò porta ad una stabilità della comunicazione superiore usando l’algoritmo IPODV rispetto ad AODV [10].

3.4.1.2 Algoritmi di routing geografico

Questa tipologia di routing si basa, come si deduce dal nome, sulla conoscenza delle coordinate geografiche dei nodi: in linea di principio, la scelta del percorso migliore è effettuata basandosi sulle distanze tra i nodi e sulla qualità dei collegamenti tra di essi. Tale tipologia di algoritmi ha dimostrato di avere buone doti di scalabilità, mantenendo lo stesso livello di complessità anche su reti di grandi dimensioni. Nella trattazione che segue saranno analizzati alcuni algoritmi di routing di tipo geografico, e si introduce ora una notazione utile alla comprensione: la rete è

rappresentata come un grafo $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{E})$, dove \mathcal{N} è l'insieme dei vertici e \mathcal{E} è definito come

$$\mathcal{E} = \{(n_i, n_j) \mid M_{ij} \geq Q\}$$

dove M è la metrica che esprime il valore della qualità di un collegamento tra due nodi (dato da Q). L'insieme \mathcal{E} è ovviamente tempo-variante ed è necessario che l'algoritmo di routing si adatti di conseguenza. Tra gli algoritmi che afferiscono a questa tipologia analizzeremo il Beacon Less Routing (BLR) [35], il Beacon Based Routing (BBR) [11] e l'Implicit Geographic Forwarding (IGF) [36]; per confronti nei test prestazionali [11] saranno citati il Shortest Path Routing (SPR) [11] e il Flooding [37]. Tutti gli algoritmi in questione, eccetto l'SPR, sono basati sul concetto di neighbourhood (vicinanza), che per un nodo n_i è definita come

$$N_i = \{j \in A \mid (n_i, n_j) \in \mathcal{E}\}$$

dove A è l'insieme dei nodi attivi, cioè accesi, e abilitati a trasmettere.

- Beacon Less Routing (BLR) con Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [11]: in questo algoritmo, i nodi sono a conoscenza della topologia della rete, ma non dell'attuale insieme di vicinanza. La trasmissione dei pacchetti segue questo processo: se un pacchetto è generato da un nodo $n_{i(k)}$ (il k -esimo ripetitore, che sarebbe la sorgente se $k=0$) e ricevuto da un nodo ripetitore n_j in $N_{i(k)}$, allora quest'ultimo lo ritrasmetterà con un ritardo inversamente proporzionale alla distanza tra n_j e il nodo di destinazione D ; se esiste un altro nodo n_l che sta già trasmettendo, il primo rinuncia, altrimenti ritrasmette, e diventa così il $k+1$ esimo ripetitore. L'algoritmo BLR ha due difetti: innanzitutto, sussiste il problema della duplicazione dei pacchetti, che emerge nel caso in cui n_j e n_l siano in $N_{i(k)}$; in questo caso, più di un nodo di $N_{i(k)}$ avrebbe il ruolo di $k+1$ esimo ripetitore. Inoltre, come secondo problema, potrebbe succedere che non ci sia nessun nodo nell'insieme di vicinanza verso la destinazione: cioè anche se in realtà i nodi $n_{i(k)}$ e D sono connessi fisicamente, non lo sono secondo la definizione di vicinanza data sopra. Tutto ciò equivale a "percorso interrotto", e inizia a questo punto una procedura di recupero che usa il GPSR: un segnale di broken-route (brm) viene mandato da $n_{i(k)}$ a $n_{i(k-1)}$, e $n_{i(k-1)}$ cerca di trovare una rotta differente verso D ; se fallisce, manda un brm anche a $n_{i(k-2)}$ e così via. I vantaggi del GPSR sono evidenti dalla figura 3.14.
- Implicit Geographic Forwarding (IGF) con GPSR [11]: questo algoritmo utilizza pacchetti RTS/CTS (request to send / clear to send) per rimediare al problema della duplicazione dei pacchetti dell'algoritmo BLR sopra esposta. Il nodo $n_{i(k)}$, che deve spedire il messaggio, invia un RTS, ricevuto da tutti gli n_j appartenenti a $N_{i(k)}$; i nodi che lo ricevono, rispediscono un CTS con un ritardo che dipende dalla loro distanza dal nodo di destinazione D . Quindi, il

nodo n_j che ha la minore distanza da D risponde per primo, sarà selezionato come $k+1$ esimo ripetitore, e il nodo n_i invierà a questo il messaggio da spedire; gli altri nodi che percepiscono che un CTS è già in invio, possono evitare di rispondere all'RTS giunto loro. Con questo meccanismo, IGF evita la duplicazione, tuttavia c'è il rischio di collisioni dei pacchetti CTS, che richiede un metodo di gestione delle collisioni. Infine, per risolvere il problema di percorsi non connessi al nodo D, il GPSR è utilizzato da questo algoritmo esattamente nel modo sopra esposto per il BLR.

- Beacon Based Routing (BBR) con GPSR [11]: questo algoritmo sfrutta la trasmissione periodica di messaggi HELLO (hms) per aggiornare le distanze tra nodi; il nodo n_i , quindi, è a conoscenza del gruppo di nodi vicini N_i grazie alla ricezione di questi messaggi, e può inviare il pacchetto da trasmettere al nodo di tale gruppo che è più vicino alla destinazione. Anche il BBR implementa una strategia di recupero GPSR: se il nodo $n_{i(k)}$ non riceve la ritrasmissione da $n_{i(k+1)}$, esso sceglie il secondo nodo “migliore” nella sua lista, che diventa il $k+1$ esimo e così via; se non si trova nessun nodo in grado di spedire il pacchetto, si invia un brm al nodo precedente, il $k-1$ esimo. Rispetto al BLR e IGF, il BBR richiede messaggi HELLO per aggiornare le liste di vicinanza mantenute ai nodi, ma evita sia la duplicazione dei pacchetti sia l'overhead dovuto ai pacchetti RTS/CTS.
- Shortest path routing (SPR) [11]: si tratta di un algoritmo che, a partire dalla conoscenza dell'insieme \mathcal{E} , definito all'inizio di questo paragrafo, trova il “miglior percorso” tra due nodi minimizzando una certa funzione di costo. Per avere un termine di confronto con gli algoritmi di routing sopra citati, in questo contesto interessa minimizzare il ritardo, e quindi il numero di “passi” che portano alla destinazione, e l'energia totale richiesta per spedire il pacchetto. Definiamo con P_{max} la massima potenza inviata dai dispositivi. Il problema della minimizzazione del ritardo può essere formulato come segue:

$$\begin{cases} \min_R L \\ R = [n_{i_0}, \dots, n_{i_L}] \\ M_{i(k), i(k+1)} \geq Q & k = 0, \dots, L-1 \\ P_{i(k)} \leq P_{max} & k = 0, \dots, L-1 \end{cases}$$

$n_{i(0)}$ identifica il nodo sorgente, $n_{i(L)}$ la destinazione, e P_i è la potenza inviata dal dispositivo al nodo i -esimo; la soluzione del problema posto si può trovare usando l'algoritmo di Dijkstra. Nel caso in cui una rete non applichi criteri di adattamento della potenza, dove cioè i nodi o trasmettono potenza 0 (spenti) o potenza massima (se trasmettono), il problema posto ha come soluzione il valore minimo dell'energia, pari a $L \times P_{max} \times T_p$, dove T_p è la durata del pacchetto. Chiaramente, la conoscenza dell'insieme \mathcal{E} da parte del nodo sorgente

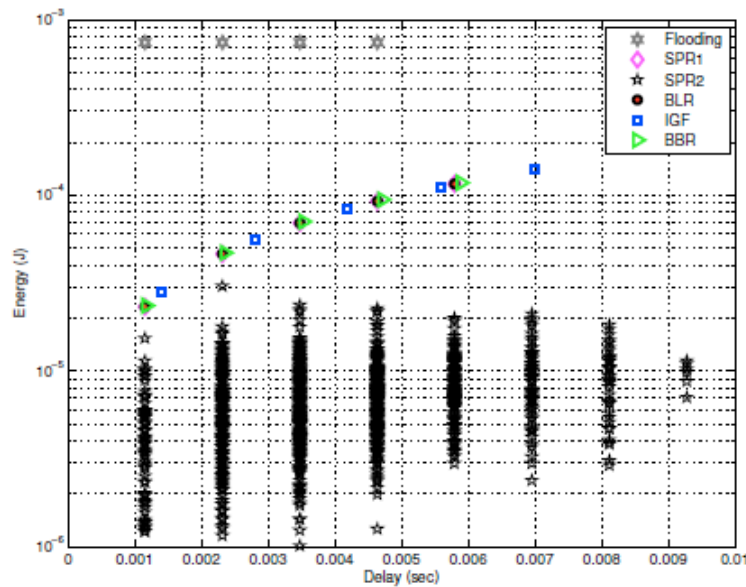


Figura 3.11: Energia utilizzata in funzione del ritardo, con $Q=100$ kbit/s; tratta da [11]

richiede un overhead considerevole e una certa sensitività alle variazioni della rete: un lento adattamento ai cambiamenti topologici può diventare inaccettabile in applicazioni di questo tipo, dette delay-sensitive, con connessioni tempo varianti dei nodi.

- Flooding [11]: la versione base del “flooding” prevede semplicemente che ogni nodo che riceve un messaggio, lo ritrasmetta; tra gli evidenti vantaggi c’è il ridottissimo overhead, ma ha grossi svantaggi in termini di energia consumata per pacchetto.

Segue ora un elenco che evidenzia, alla luce dei risultati prestazionali illustrati nelle figure 3.11...3.13, gli aspetti salienti relativi all’implementazione di algoritmi di routing di tipo geografico. Si veda [11] per i dettagli tecnici riguardo l’infrastruttura usata nei test.

3.4.1.3 Confronto tra gli algoritmi di routing geografico

- Il consumo energetico di una soluzione basata su algoritmo IGF è superiore rispetto ad una implementazione dell’SPR, a causa dei pacchetti RTS/CTS: la segnalazione, inoltre, ha un effetto deleterio anche sul ritardo, perché eseguita ad ogni istanza della trasmissione
- È evidente che la tecnica in assoluto più veloce per spedire un messaggio risulta il flooding, ma tale celerità ha effetti molto pesanti in termini di consumo di energia

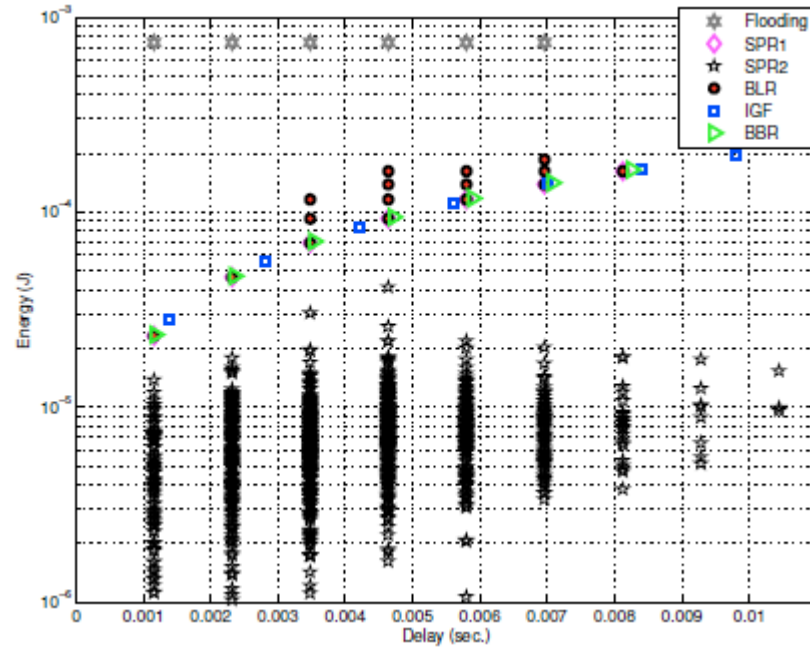


Figura 3.12: Energia utilizzata in funzione del ritardo, con $Q=200$ kbit/s; tratta da [11]

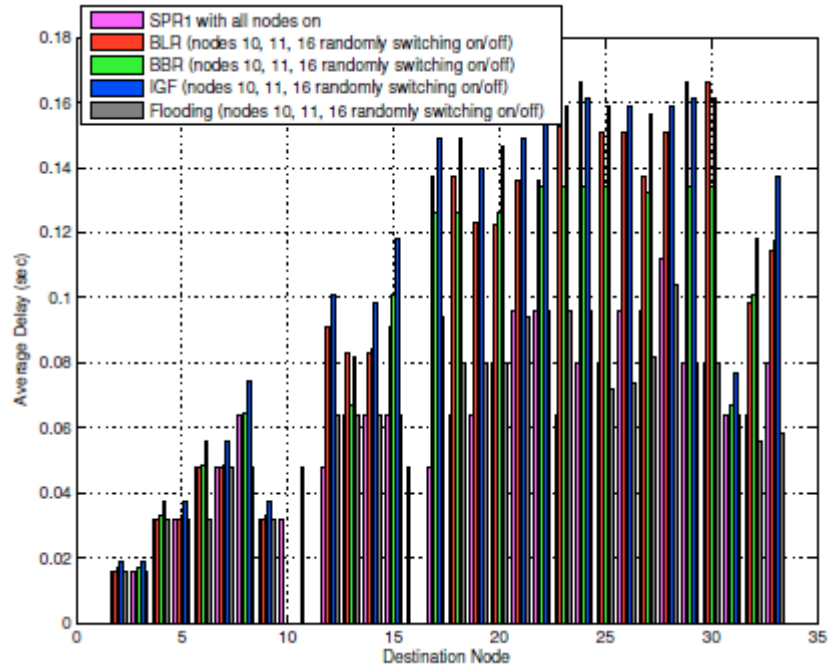


Figura 3.13: Ritardo medio in una situazione dinamica, con nodi accesi e spenti, e $Q=200$ kbit/s; tratta da [11]

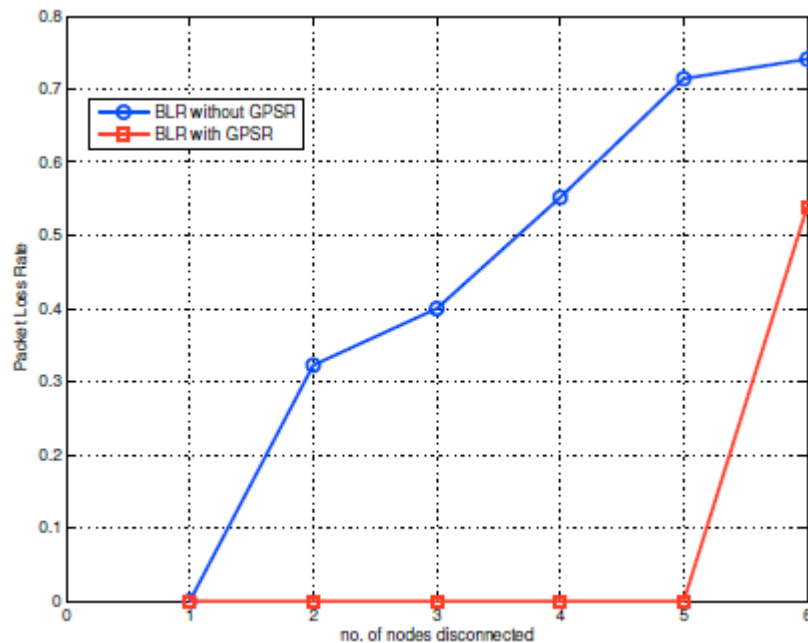


Figura 3.14: Packet Loss Rate (PLR) per l'algoritmo BLR, con e senza GPSR; tratta da [11]

- L'algoritmo BLR ha un consumo energetico più alto rispetto a SPR e BBR, a causa del problema della duplicazione dei pacchetti
- In caso di variazioni topologiche della rete (nei test eseguiti [11] vengono accesi e spenti casualmente 3 nodi ogni 100 pacchetti), si nota ovviamente un considerevole aumento del ritardo impiegando gli algoritmi BLR e IGF, a causa dell'intervento del sistema di recupero delle rotte GPSR, e dell'impiego massiccio di pacchetti RTS/CTS nell'algoritmo IGF. Le prestazioni dell'algoritmo BBR sono superiori sia al BLR che all'IGF, grazie all'utilizzo di messaggi HELLO che rende note eventuali disconnessioni di nodi. Riguardo il flooding, le prestazioni rimangono pressoché inalterate grazie alla ridondanza delle trasmissioni.
- Dal grafico in figura 3.14 si nota quanto sia importante la soluzione integrata GPSR per mantenere l'indice di Packet Loss Rate (PLR) più basso possibile
- Gli algoritmi di routing geografico trattati in questo paragrafo rappresentano un trade-off prestazionale tra l'SPR, che garantisce il minor consumo energetico, e il flooding, migliore in termini di ritardo di trasmissione: la scelta migliore quindi dipende dalle esigenze del sistema all'interno del quale tali algoritmi vanno implementati.

3.4.2 Algoritmi specifici per PLC

3.4.2.1 Algoritmo Powerline Multipath Routing (PMR)

Questo algoritmo di routing è del tipo “on demand” [12], e costruisce percorsi multipli attraverso cicli di request/reply. Quando un nodo Master ha bisogno di un percorso verso un certo nodo Slave, invia un messaggio RREQ (“route request”) all’intera rete; alcune copie di questo messaggio, attraverso differenti percorsi, raggiungeranno la destinazione come risultato del flooding di tale messaggio, dopodiché il nodo destinazione avrà a disposizione questi percorsi, esplorati dai pacchetti RREQ, e invierà pacchetti RREP (“route reply”) alla sorgente attraverso tali rotte. Un parametro definito average hops (distanza media tra due nodi) viene aggiornato su ogni nodo ogni volta che vi arriva un messaggio RREQ. In tal modo, i messaggi RREQ che corrispondono ad una distanza (hop count) molto superiore a questo valore medio, possono venire scartati: tale dinamica può essere modellata con uno schema probabilistico, nel senso che se il messaggio RREQ corrisponde ad una valida distanza, all’interno di un certo range, esso verrà rispedito successivamente, altrimenti, con una certa probabilità, verrà scartato. I nodi intermedi, secondo l’algoritmo PMR, in realtà trasmettono i pacchetti duplicati il cui hop count è non superiore a quello del primo RREQ più un offset definito come $(\text{Average hops})/k$, dove k è un intero positivo che varia a seconda delle dimensioni della rete; così facendo, in una rete di grandi dimensioni si possono fare più scelte di percorso. Dal flooding dei messaggi RREQ emerge il problema che quando il messaggio RREQ più veloce raggiunge un certo nodo, esso non ha ancora ricevuto altri RREQ, quindi avvia la ritrasmissione in risposta ad esso: tuttavia fanno lo stesso anche gli altri nodi intermedi vicini, così si crea un traffico costituito da pacchetti RREQ sovrapposti, e l’occupazione troppo elevata di risorse causata dal primo RREQ impedisce la corretta trasmissione degli altri RREQ che rappresentano validi percorsi alternativi. Per risolvere tale problema, all’interno del PMR è introdotto un meccanismo di back off: il sistema attende un certo tempo prima di trasmettere il primo RREQ, e il range di questo tempo va da 0 a un valore massimo, max delay. Nei test effettuati in [12] in realtà il massimo valore è pari a $(\text{max delay} \times \text{in hops})$ dove il parametro in hops varia a seconda delle dimensioni della rete: i pacchetti RREQ che si propagano dopo il primo RREQ in un tempo massimo pari a in hops hanno le stesse possibilità del primo di essere ritrasmesse. Tale soluzione evita che l’RREQ più veloce si moltiplichi troppo rapidamente e occupi troppe risorse della rete. Un’altra caratteristica dell’algoritmo, utile nelle reti di grandi dimensioni, è la selezione casuale dei pacchetti da spedire dal buffer, così da garantire la massima eterogeneità del traffico broadcast. Da notare che se la capacità massima del buffer viene superata, i nuovi pacchetti RREQ ricevuti verranno scartati; comunque, anche se la capienza massima non è raggiunta, i pacchetti RREQ ricevuti vengono filtrati: quelli molto simili a pacchetti già presenti nel buffer, non vengono inseriti. In ultima analisi, è importante notare come

l'algoritmo PMR abbia marcate somiglianze, nel suo funzionamento, con l'algoritmo AODV [34], che è già stato citato essendo alla base dell'algoritmo IPODV descritto nel paragrafo 3.4.1.1. L'algoritmo PMR innanzitutto, così come AODV, si basa sulla trasmissione di messaggi RREQ/RREP. Inoltre il criterio di ritrasmissione dei pacchetti RREQ del PMR è una versione evoluta di quello usato da AODV: quest'ultimo infatti non adotta le ottimizzazioni che implementa PMR grazie ai parametri average hops, variabile nel tempo, e k , variabile a seconda delle dimensioni della rete. Tra le differenze, invece, è evidente il back off per il primo pacchetto RREQ presente nel PMR e non implementato in AODV, così come la selezione casuale dal buffer dei pacchetti.

A scopo di confronto, che mostra come il PMR sia la scelta migliore, sarà ora illustrato il funzionamento dell'algoritmo Split Multipath Routing (SMR) [13], progettato per reti ad-hoc. Questo algoritmo di routing è anch'esso di tipo on demand. Il suo funzionamento sarà illustrato solo brevemente; per la trattazione dettagliata si rimanda a [13]. L'algoritmo SMR prevede che un nodo sorgente, se ha necessità di trasmettere, invii in flooding un messaggio RREQ all'intera rete; i vari pacchetti duplicati raggiungeranno la destinazione su rotte diverse. I nodi intermedi però trasmettono solamente i pacchetti duplicati che sono passati attraverso un percorso diverso da quello del primo pacchetto RREQ ricevuto, e il cui hop count è non superiore a quello del primo pacchetto RREQ. Così l'algoritmo seleziona i percorsi maggiormente disgiunti; le prestazioni però degradano rapidamente all'aumentare delle dimensioni della rete.

Riguardo i risultati prestazionali dell'algoritmo PMR, come già fatto in precedenza, non saranno esposti i dettagli tecnici dell'ambiente di simulazione, per i quali si rimanda a [12]: in figura 3.15 è rappresentato un grafico che evidenzia le performance, come indice di successo nel trovare i percorsi più disgiunti rispetto al parametro average hops [12].

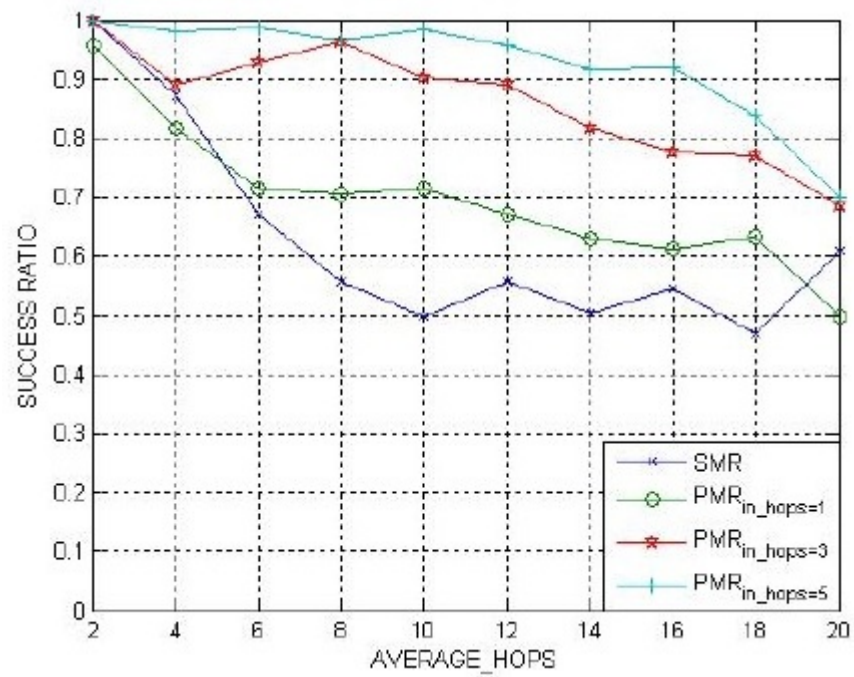


Figura 3.15: Prestazioni degli algoritmi PMR e SMR a confronto; tratta da [12]

Capitolo 4

Conclusioni

Nella prima parte di questa tesi è stata illustrata l'importanza del rinnovamento della rete di distribuzione dell'energia di vecchia generazione. La creazione di una smart grid porta numerosi vantaggi: ne traggono beneficio sia l'ambiente, poiché è una struttura che utilizza fonti rinnovabili e distribuisce l'energia in maniera efficiente, sia ovviamente gli utenti finali. Essi diventano i fruitori di un sistema che non si limita alla fornitura energetica, ma implementa servizi che danno un nuovo ruolo agli utenti, che ora partecipano in maniera attiva alla funzionalità della rete: basti pensare ai futuri veicoli elettrici, in grado di fornire energia alla smart grid nei momenti in cui non sono utilizzati. La creazione di un'infrastruttura con funzionalità così evolute richiede un supporto tecnologico allo stato dell'arte: in questa tesi sono state approfondite in particolare le comunicazioni su power line. Esse coniugano una estrema facilità di implementazione, dato che i cavi sono già presenti nella struttura della rete, con prestazioni che ad oggi hanno raggiunto ottimi livelli in rapporto agli scopi per i quali si utilizzano all'interno della smart grid. Sono stati poi evidenziati gli aspetti salienti del livello fisico e del livello data link di un sistema basato su power line. Le conclusioni tratte portano a decretare, allo stato attuale, che per quanto riguarda il livello fisico, lo schema di modulazione OFDM rappresenta la scelta ottimale, rispetto sia alle modulazioni a portante singola sia a quelle a spettro espanso: le modulazioni a portante singola, nelle trasmissioni power line ottengono prestazioni modeste, mentre quelle a spettro espanso soffrono di problematiche relative al numero di utenti della rete. Riguardo il livello data link invece, il Carrier Sense Multiple Access (CSMA) si rivela la scelta migliore, grazie all'affidabilità che fornisce nella trasmissione dei pacchetti, se confrontato sia con protocolli ad accesso deterministico sia con altri protocolli ad accesso casuale. Infine, nell'ultima parte di questa tesi, è stato trattato un problema che riguarda i livelli più alti dello stack protocollare ISO/OSI: il routing. A causa delle peculiarità topologiche e funzionali delle sottoreti che compongono una smart grid, è pressoché impossibile decretare un algoritmo di routing migliore di tutti gli altri in senso assoluto: ecco quindi che, a seconda della

classificazione dimensionale di tali sottoreti, sono stati analizzati gli algoritmi che ad oggi sembrano essere più adatti in ciascun ambito e ne sono state illustrate le prestazioni.

Bibliografia

- [1] M.D. Rahat Hossain, Amanullah Maung Than Oo, A B M Shawkat Ali, “*Evolution of Smart Grid and some pertinent issues*” , Proceedings of 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010, pp. 1-6
- [2] X.-P. Zhang, C. Rethanz, X. Bai, Z. Wu and U. Hager, “*Towards European Smart Grids*”, Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp. 1-5
- [3] Fang yuan Xu, Loi Lei Lai, “*Scope design, characteristics and functionalities of Smart Grid*”, Proceedings of Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011, pp.1-5
- [4] Vehbi C. Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati, Gerhard P. Hancke, “*Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards*”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, 2011
- [5] Nico Saputro, Kemal Akkaya, Suleyman Uludag, “*A survey of routing protocols for smart grid communications*”, Computer Networks, vol. 56, no. 11, pp. 2742–2771, Elsevier, 2012
- [6] Stefano Galli, Anna Scaglione, Zhifang Wang, “*For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid*”, Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 998-1027, 2011
- [7] J.Heo, K.Lee, H.K.Hang, D.S. Kim, W.H.Kwon, “*Adaptive channel state routing for home network systems using power line communications*”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1410-1418, 2007
- [8] C.E. Perkins, P. Bhagwat, “*Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing for mobile computers*”, Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications SIGCOMM, 1994, pp. 234-244

- [9] N. Pavlidou, A.Han Vinck, J. Yazdani, B.Honary, "*Power line communications: state of the art and future trends*", IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 4, pp. 34-40, 2003
- [10] W.Gao, W.Jin, H.Li, "*An improved routing protocol for power line network based on aodv*", Proceedings of 11th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2011, pp. 233-237
- [11] M.Biagi, L.Lampe, "*Location assisted routing techniques for power line communication in smart grids*", Proceedings of First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010, pp. 274-278
- [12] S.Liang, S.Chen, X.Ding, C.Zhang, Y.Xu, "*A broadcasting algorithm of multipath routing in narrowband power line communication networks*", Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), 2011, pp.467-471
- [13] S.J.Lee, M.Gerla, "*Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks*", Proceedings of IEEE International Conference on Communications - ICC, 2001, pp. 3201-3205
- [14] G.Iyer, P.Agrawal, E.Monnerie, R.Cardozo, "*Performance analysis of Wireless Mesh routing protocols for smart utility Networks*", Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, pp. 114 - 119
- [15] F.Pacheco, L.Pinho, E.Tovar, "*Queuing and routing in a hierarchical powerline communication system*", Proceedings of 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2005, pp. 8-66
- [16] H. Fahrangi, "*The path of the smart grid*", IEEE Power and Energy Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, 2010
- [17] S.Bannister, P.Beckett, "*Enhancing power line communications in the smart grid using OFDMA*", Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) 2009, pp.1-5
- [18] www.prime-alliance.org
- [19] F.Beidou, W.G.Morsi, C.P.Diduch, L.Chang, "*Smart grid: challenges, research directions and possible solutions*", Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010, pp. 670-673
- [20] Y.Phulpin, J.Barros, D.Lucani, "*Network coding in smart grids*", Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011, pp. 49-54

- [21] I. Berganza, A. Sendin, J. Arriola, "*PRIME: powerline intelligent metering evolution*", Proceedings of CIRED Seminar: SmartGrids for Distribution, 2008, pp. 1-3
- [22] A. Majumder, J. Caffery Jr., "*Power line communications: an overview*", IEEE Potentials, vol. 23, no. 4, pp. 4-8, 2004
- [23] M. Gotz, M. Rapp, K. Dostert "*Power Line Channel Characteristics and their effect of communication system design*", IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 4, pp. 78-86, 2004
- [24] L. Ben Saad, C. Chauvenet, B. Tourancheau, "*Heterogeneous IPv6 Infrastructure for Smart Energy Efficient Building*", Proceedings of 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), 2011
- [25] C. Jin, T. Kunz, "*Smart Home networking: combining wireless and powerline networking*", Proceedings of 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011, pp. 1276-1281
- [26] M. Rossi, L. Badia, M. Zorzi, "*On the delay statistics of SR ARQ over Markov channels with finite round-trip delay*", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 4, 2005
- [27] T. Robertazzi, "*Advanced Encryption Standard (AES)*", Proceedings of SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2012, pp. 73-77
- [28] www.rempli.org
- [29] J.G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, "*Fundamentals of WiMax - Understanding Broadband Wireless Networking*", Prentice Hall, 2007
- [30] Sesia, S., Toufik, I. and Baker, M. (eds), "*LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (UK), 2009
- [31] P. McDaniel, "*Security and Privacy Challenges in the Smart Grid*" IEEE Security & Privacy, vol. 7, no. 3, pp. 75-77, 2009
- [32] R.E. Brown, "*Impact of Smart Grid on distribution system design*", Proceedings of Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp. 1-4
- [33] H. Li, "*QoS Routing in Smart Grid*", Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2010, pp. 1-6
- [34] C.E. Perkins, "*Ad-hoc on-demand distance vector routing*", Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999, pp. 90-100

- [35] M. Heissenbüttel, T. Braun, T. Bernoulli, M. Wälchli, “*BLR: beaconless routing algorithm for mobile ad hoc networks*”, ELSEVIER Computer Communications, vol. 27, no. 11, pp. 1076–1086, 2004
- [36] S Son, B. Blum, T. He, J. Stankovic “*IGF: A state-free robust communication protocol for wireless sensor networks*”, Citeseer, 2003
- [37] G.Bumiller, L.Lampe and H. Hrasnica, “*Power Line Communications for Large-Scale Control and Automation Systems*”, IEEE Communication Magazine, vol. 48, no. 4, pp. 106-113, 2010
- [38] E. Ferro, F. Potorti, “*Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison*”, IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. 1, pp. 12-26, 2005
- [39] V.K. Garg, “*Wireless Network Evolution: 2G to 3G*”, Prentice Hall, 2001
- [40] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, Stefano Chessa, A. Gotta, Y. Fun Hu “*Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards*”, Computer Communications, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, Elsevier 2007
- [41] G. Mulligan, “*The 6LoWPAN architecture*”, Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors EmNets, 2007, pp. 78-82